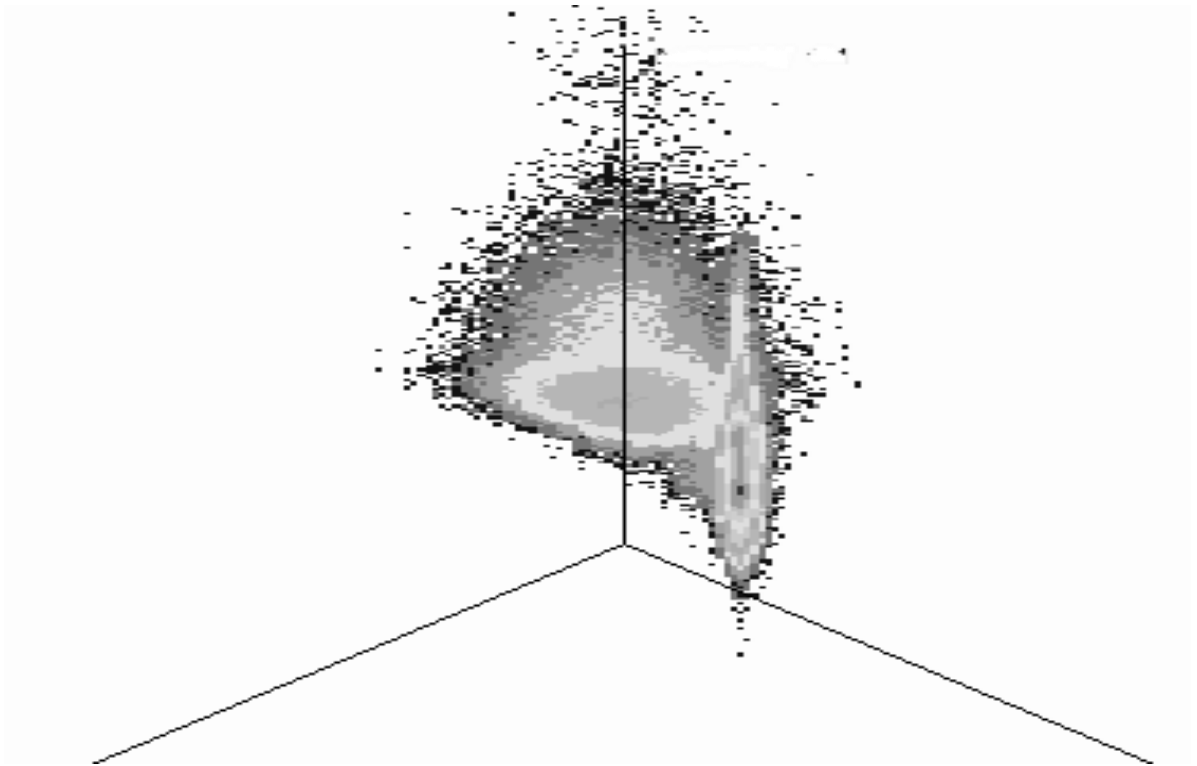


Análisis de patrones de fuentes de descargas parciales para el diagnóstico en transformadores eléctricos



Sebastián Martínez Cárdenas

Análisis de patrones de fuentes de descargas parciales para el diagnóstico en transformadores eléctricos

Sebastián Martínez Cárdenas

Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, Noviembre de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA



Análisis de patrones de fuentes de descargas parciales para el diagnóstico en transformadores eléctricos

© Sebastián Martínez Cárdenas

Directora: Sandra Milena Pérez Londoño

Pereira, Noviembre de 2017

Programa de Ingeniería Eléctrica.

Universidad Tecnológica de Pereira. La Julita. Pereira (Colombia)

TEL: (+57) (6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/index.html>

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en mi realización como persona y profesional. A Dios por la razón de mi existencia, por las capacidades y oportunidades que ha traído a mi vida para concretar mis sueños y anhelos.

Sandra y Nicolás mis padres maravillosos que sembraron valores en mi ser para alcanzar mis sueños, por sus palabras de aliento a cada instante y la lucha constante para verme crecer en todos los aspectos, lo logramos. A Martha mi abuela que sirvió de apoyo en todo este proceso, procurando siempre mi bienestar regalándome cuotas de ánimo y esperanza que fortalecieron mi vida, son de lo más grande.

Quiero compartir este logro con Laura, mi novia, aquella mujer que ha dedicado un valioso tiempo para ver un hombre pujante, confiado de sus capacidades y convencido de sus sueños, gracias por la significancia de su constancia y existencia en mi vida, está es una de las tantas alegrías que recogeremos juntos, te amo.

Un especial agradecimiento a la ingeniera Sandra Milena Pérez Londoño, directora de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma. A la Universidad tecnológica de Pereira que abrió sus puertas para enriquecer mi vida y hacerme un profesional digno para la sociedad. Especial reconocimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas al ingeniero Bernardo Gómez Dávila.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros del programa de ingeniería eléctrica, quienes aportaron inmensamente al proceso que culmina. Agradezco la comprensión, paciencia y el ánimo de todos ellos, muchas gracias. Es importante resaltar momentos significativos en mi existencia, elogiar a todas y a cada una de las personas que han marcado historia y dejan huellas imborrables en mi vida.

Resumen

En este trabajo se analizan patrones de descargas parciales que son susceptibles de aparecer en los transformadores eléctricos y que fueron obtenidos mediante el diseño y construcción de un prototipo o celda de prueba, en el laboratorio de potencia de una de las empresas fabricantes de la región. Con el prototipo se representan algunas condiciones o imperfecciones comunes, que pueden aparecer durante la etapa de manufactura del transformador y que pueden ser consideradas, bajo ciertas circunstancias, como factores determinantes en la aparición de descargas, que posteriormente potencian la posible falla del sistema de aislamiento del mismo.

Los patrones de descargas parciales obtenidos, serán de utilidad para el analista, ya que permitirán identificar y diagnosticar algunos problemas de aislamiento del equipo que se pueden estar llevando a cabo, durante la etapa constructiva del mismo y de esta forma se conseguirá mejorar la calidad del producto ofrecido.

Finalmente los resultados son vitales para garantizar productos de calidad a través de la mejora de los procesos, evitando aparición de descargas parciales. Actualmente en Colombia la prueba de descargas parciales capta el interés de las empresas de transformadores por sus grandes ventajas, aunque su uso ha sido mínimo en la industria, la necesidad actual junto con las normatividades hacen trascendental su estudio e implementación.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Justificación.....	3
1.3.	Objetivos.....	3
	1.3.1. Objetivo general.....	3
	1.3.2. Objetivo específico.....	3
1.4.	Estado del arte.....	4
1.5.	Principales resultados.....	6
1.6.	Estructura del trabajo de grado.....	6
2.	Conceptos básicos y normatividad sobre DP	7
2.1.	Introducción a las descargas parciales.....	7
2.2.	Fenómenos de aparición de descargas parciales.....	8
	2.2.1. Inducción de separación de cargas por contacto.....	8
	2.2.2. Separación de cargas inducidas por objetos cargados.....	8
2.3.	Tipos de descargas parciales.....	9
	2.3.1. Descargas superficiales.....	9
	2.3.2. Descargas internas.....	9
	2.3.3. Descargas externas ó corona.....	9
2.4.	Descripción de la prueba de descargas parciales.....	10
2.5.	Condiciones generales para la ejecución de la prueba de DP....	15
2.6.	Rutina de tensión y criterio de aceptación según IEC.....	16
	2.6.1. Transformadores secos.....	16
	2.6.2. Transformadores en aceite.....	19
2.7.	Rutina de tensión y criterio de aceptación según ANSI-IEEE...	23
	2.7.1. Transformadores secos.....	23
	2.7.2. Transformadores en aceite.....	23
3.	Caracterización de patrones de descargas parciales	29
3.1.	Introducción.....	29
3.2.	Presentación de la celda de prueba empleada en el laboratorio	29
3.3.	Validación de la celda de pruebas	31
3.4.	Obtención de los patrones de descargas parciales.....	34
4.	Análisis electrostático de un transformador	47
4.1.	Introducción.....	47
4.2.	Comportamiento ideal del campo eléctrico.....	47
4.3.	Comportamiento real del campo eléctrico.....	50

5.	Análisis e interpretación de la prueba de DP en un trafo	54
5.1.	Prueba de DP a un trafo seco de 1250 kVA.....	54
6.	Conclusiones y trabajos futuros	62
6.1.	Conclusiones.....	62
6.2.	Trabajos futuros.....	64
	Apéndices	65
A.	Bibliografía.....	65

Capítulo 1

Introducción

En éste documento se presenta una propuesta para el trabajo de grado, orientada a la determinación y análisis de patrones de fuentes de descargas parciales que pueden presentarse en transformadores eléctricos. El estudio está basado en la implementación de diferentes pruebas de descargas parciales (DP), realizadas en el laboratorio de pruebas de una de las más reconocidas empresas de transformadores de la región.

La propuesta pretende convertirse en una guía para el analista de dichas pruebas, ya que por medio de la interpretación de los resultados, podrá considerar en la etapa de diseño, aquellos factores (internos y/o externos) que influyen sobre la presencia de descargas no deseables en el transformador. El interés en el análisis de dicha prueba por parte de la empresa, surge ante la reconocida importancia que representa dicha prueba sobre el desempeño final del equipo.

El documento se compone inicialmente de una etapa de fundamentación teórica donde se consideran algunos conceptos de descargas parciales, la obtención de información de patrones de DP fundamentando en los fenómenos que los originan y además los estándares y normas que lo rigen bajo el concepto de ingeniería [1][2][3][4][5].

1.1. Planteamiento del problema

La confiabilidad del sistema eléctrico depende en gran medida de la calidad de los activos fijos que lo conforman. El transformador es un equipo esencial en un sistema eléctrico, debido a su capacidad de transferir potencia entre circuitos con diferentes

niveles de tensión, mediante un proceso de conversión con mínimas pérdidas.

Para asegurar una adecuada operación de los transformadores instalados en un sistema, es preciso realizarles diferentes ensayos o pruebas, para verificar el cumplimiento de unos requisitos básicos en cuanto a nivel de pérdidas, nivel de aislamiento, entre otros. De esta manera es posible identificar por parte de la empresa fabricante, aquellos factores que interfieren en la obtención de un excelente producto y buscar minimizarlos o eliminarlos.

La necesidad de estándares de alta calidad en los productos, llevan a las empresas fabricantes de transformadores, a la búsqueda de herramientas eficientes que les permita identificar sus debilidades, desde el principio hasta el final de la línea de producción. Una adecuada información obtenida en las pruebas que se les realiza a los equipos, permite tomar medidas correctivas para disminuir posibles problemas en la etapa de diseño o producción. Con esto no solo se consigue entregar productos conformes sino también de calidad, que fortalecen la competitividad de la empresa fabricante en el mercado.

Entre los ensayos que se le realizan a un transformador se encuentran los de rutina (como ensayo en vacío, cortocircuito, entre otros). Para determinar el nivel de aislamiento del transformador, se realizan las pruebas de tensión aplicada y tensión inducida, para comprobar que es apto para soportar los diferentes niveles de tensión a los que podría estar expuesto el equipo.

Las pruebas de descargas parciales son una extensión a los ensayos anteriores y permiten realizar un diagnóstico interno del estado del transformador. Esta prueba se realiza a través de un equipo especial (para el caso de la empresa, MPD 600 de Omicron) que permite analizar el estado del objeto bajo prueba, mediante la obtención de patrones.

Dichos patrones pueden representar problemas de diseño o descuidos en el proceso de fabricación del transformador, entre otros factores, que a largo plazo, pueden ocasionar deterioro o perforación del material, y/o ruptura ó arborización de elementos sólidos del transformador. Estas consecuencias son desalentadoras, ya que ningún fabricante o usuario desea una disminución de la vida útil de los equipos, debido a un funcionamiento inadecuado.

Actualmente, el problema del ensayo de descargas parciales radica en la adecuada interpretación de los patrones, debido a que la gran cantidad de posibles factores o combinación de ellos, hace complejo conocer específicamente que está provocando realmente las descargas en el transformador. Una prueba de tal importancia para el desempeño del transformador, debe ser atendida y estudiada de la manera más adecuada. Desafortunadamente, las pruebas de descargas parciales son de carácter especial, por ello es pertinente que las áreas de ingeniería de las empresas de fabricación de transformadores, posean conocimientos correspondientes al tema

electrostático bajo el contexto de descargas parciales.

1.2. Justificación

Las descargas parciales DP son eventos que ocurren en el material dieléctrico del transformador, que indican una degradación del aislamiento y que pueden determinar una falla potencial del equipo. Mediante una adecuada interpretación de los resultados o patrones obtenidos de una prueba de descargas parciales, es posible diagnosticar efectivamente el defecto del transformador y plantear su corrección, mediante mejoras en la etapa de diseño y/o construcción (por ejemplo, correcta manipulación de los materiales empleados en la fabricación).

Ante la gran complejidad presentada en la identificación de fuentes de descargas parciales, es preciso recurrir a extensas pruebas en el laboratorio sobre prototipos, para obtener una relación entre anomalía o fuente de descarga (interna o externa) y patrón obtenido por medio de equipo y software especializado.

Por esta razón y como una primera aproximación a la caracterización de DP en transformadores de la empresa, se pretende en este proyecto obtener un compendio de diversos patrones de descargas parciales de los prototipos, con la implementación de una celda de prueba, y establecer las condiciones mínimas requeridas para un ensayo confiable y un dictamen seguro con el equipo de medición MPD 600 [6][7]. Estos resultados serán útiles en la detección, diagnóstico y solución de problemas específicos del transformador, para la empresa fabricante.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar los patrones de descargas parciales obtenidos en el laboratorio de potencia, al considerar desperfectos intencionales y su influencia en la distorsión del campo del transformador.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte relacionado con el ensayo de descargas parciales en transformadores.

- Estudiar la normatividad vigente IEC y ANSI relacionada con las descargas parciales y los diferentes factores que las originan.
- Realizar un reconocimiento del equipo MPD 600 de la empresa, empleado para adquisición de los patrones de descargas parciales en el laboratorio.
- Diseñar y validar con el método de elementos finitos, una celda de prueba, para el ensayo de prototipos que originen descargas parciales.
- Recopilar patrones de descargas parciales realizadas en la celda de prueba, mediante la simulación de desperfectos (prototipos), que se presentan en las etapas de diseño y fabricación de transformadores.
- Analizar la distorsión en el campo eléctrico en un transformador debido a anomalías como fuentes de descargas parciales usando modelado por elementos finitos.
- Interpretar la prueba de descargas parciales realizada a transformadores, mediante el uso de herramientas de análisis, bajo el cumplimiento de la normatividad estipulada.
- Documentar los principales resultados, conclusiones y recomendaciones.

1.4. Estado del arte

La detección de los eventos de descargas parciales en equipos de alta tensión se comenzó a analizar desde el año 1940, cuando el primer comité técnico del grupo NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) estudió las deficiencias presentadas en la operación de aisladores, contactos metálicos y en conductores eléctricos. Publicaciones posteriores consistieron en revisiones exhaustivas del documento inicial, donde grupos como la CISPR (*Comité International Spécial des Perturbation Radioélectrique*) pertenecientes a la IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*) participaron de las investigaciones. Estas comisiones se han dedicado a mejorar sustancialmente la prueba de descargas parciales a través del tiempo. Algunas prácticas experimentales consistieron en el análisis de descargas parciales por efecto corona entre electrodos de alta tensión, separados por un medio aislante, donde se usaron medios dieléctricos gaseosos como el aire, dieléctricos sólidos como porcelana y papel, además de sustancias

líquidas como aceite mineral, aceite ricino y siliconas [1][2][3].

En respuesta a la necesidad de conocer los comportamientos patronales de los transformadores, específicamente en los aislamientos, se han realizado estudios experimentales con papel impregnado de aceite a altas temperaturas para simular los eventos de sobrecarga y registrar sucesos de descargas parciales sobre la superficie de contacto entre el papel y el aceite [7]. Las anteriores investigaciones consistieron en someter a estrés eléctrico y térmico dichos elementos, encontrando un incremento de DP con el ascenso de la temperatura, además se estableció que las variaciones de temperatura producen cambios de color del aceite. Por ejemplo es posible encontrar un color café claro en el aceite debido al envejecimiento del papel fruto de la oxidación por estrés térmico. Con la investigación se determinó que la tasa de repetición de descargas parciales es proporcional a los incrementos o descensos de temperatura.

En una investigación realizada el año 2012, se estudiaron descargas superficiales, efectos corona y cavidades en los aislamientos, donde se usaron herramientas sofisticadas como PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*) y PSA (*Pulse Sequential Analysis*) para los respectivos análisis. En dicha investigación se determinaron patrones de descargas parciales bajo diferentes niveles de tensión aplicadas [2][6].

Con los modernos equipos de adquisición de datos, con los que se cuenta actualmente, se pueden realizar pruebas más exhaustivas y precisas; por ello una investigación realizada en el Reino Unido, en la universidad de Southampton determinó que los patrones de descargas parciales debido a cavidades esféricas en los aislamientos dependen de tres condiciones: la frecuencia a la cual se realiza la prueba, la tensión aplicada al objeto de prueba y el diámetro de la cavidad. Ciertas conclusiones fueron extendidas a cualquier tipo de fuente de DP, puesto que condiciones como la frecuencia y tensión aplicada son variables comunes en el registro de DP [3].

En Suecia se ha dedicado tiempo al estudio de fenómenos de descargas parciales en prototipos como cavidades, aceites con mucho tiempo de servicio, cables y aisladores con defectos. En [5] se determinó la descarga superficial como un efecto de gran repetitividad en dichos prototipos, aunque la investigación no contó con herramientas de software especializado para los análisis de fuentes de descargas parciales.

Investigadores a nivel nacional, han focalizado sus esfuerzos en la detección de descargas parciales en el aislamiento de los transformadores eléctricos de potencia, por métodos de ultra alta frecuencia. Como resultado de dicha investigación, se obtuvieron patrones claves en el diagnóstico de dichos equipos [8] y se desarrollaron sistemas de adquisición de eventos de descargas parciales

para la ejecución de los respectivos análisis [9].

La literatura relacionada con la presencia de descargas parciales a nivel de distribución es escasa, más del 80% de los documentos revisados en la literatura, relacionan sus trabajos a transformadores de potencia. Además, son pocos los documentos que incluyan el estudio de prototipos con las herramientas de diagnóstico actuales.

1.5. Principales resultados

Los siguientes corresponden a los principales resultados obtenidos de este trabajo:

- Recopilación de fuentes de descargas parciales con ayuda del software MPD 600 para diagnóstico de transformadores.
- Determinación de diferentes patrones de descargas parciales en transformadores y en un prototipo diseñado, al emplear herramientas avanzadas como H(Q) y 3PARD.
- Análisis del comportamiento del transformador mediante elementos finitos en presencia y ausencia de “fuentes” de DP.

1.6. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma:

- En el capítulo 2 se presentan los conceptos básicos de la prueba de descargas parciales en los transformadores y los aspectos más importantes relacionados con la normatividad tanto IEC como ANSI.
- En el capítulo 3 se presenta el diseño y la validación de la celda de prueba empleada en el laboratorio. Adicionalmente se entregan y analizan los patrones de DP de los prototipos diseñados.
- En el capítulo 4 se expone el análisis electrostático de un transformador trifásico de 500 kVA analizado en FEMM (Finite Element Method Magnetics) bajo condiciones ideales y reales (focos de DP).
- El capítulo 5 contiene la interpretación de una prueba de DP realizada a un transformador trifásico de 1250 kVA, usando la herramienta especializada 3PARD.
- Finalmente en el capítulo 6 se reportan las principales conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros del proyecto.

Capítulo 2

Conceptos básicos y normatividad sobre DP

2.1. Introducción a las descargas parciales

Las descargas parciales son descargas eléctricas que se generan por la ruptura parcial de un medio aislante. La ruptura da lugar a pulsos de corriente que conllevan a deterioros, perforaciones y averías de los materiales dieléctricos que componen los equipos de alta tensión. El concepto de descargas parciales puede ser definido como el estrés dieléctrico que se produce en una región de poca o nula conductividad eléctrica, comprendida entre dos electrodos a diferente potencial.

Una consecuencia notable de las imperfecciones en los materiales aislantes es la distorsión de las líneas equipotenciales del campo eléctrico. Si se observa la figura 2.1 las líneas de campo se afectan por una perforación que puede generar posteriormente la aparición de descargas parciales.

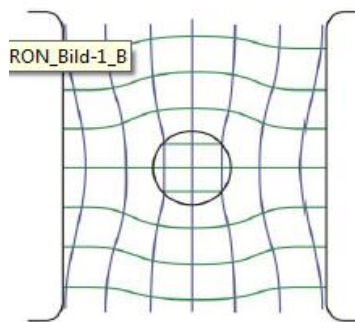


Figura 2.1 Distorsión de líneas equipotenciales en el material ante una anomalía tipo cavidad.

Es inminente que las descargas parciales se encuentran estrechamente ligadas con la condición física del aislante. Si el material presenta una imperfección y además lo envuelve un campo eléctrico, es muy probable la aparición de descargas parciales.

Las descargas parciales pueden llegar a convertirse en descargas transversales, es decir la unión de dos puntos a diferente potencial mediante un arco eléctrico.

2.2. Fenómenos asociados a la aparición de descargas parciales

La acumulación de cargas genera distorsiones del campo eléctrico y las líneas equipotenciales, originando un escenario ideal para la aparición de descargas parciales. Existen fenómenos físicos de orden atómico que se explican a continuación.

2.2.1. Inducción de separación de cargas por contacto

Una separación o intercambio de cargas, también llamado efecto triboeléctrico, se puede presentar por el contacto entre dos materiales, generalmente por la unión de aislantes con diferente disposición molecular. Por ejemplo, el papel es un material aislante que tiende a acumular gran cantidad de cargas positivas. La acumulación de dichas cargas se hace más severa, cuando existen imperfecciones en el material que favorecen la aparición de descargas parciales.

2.2.2. Separación de cargas inducidas por objeto cargado

Aquellos elementos o materiales que se encuentran cargados eléctricamente y a su vez están cerca de objetos neutros como el papel o el aceite, posibilitan la separación de cargas eléctricas. El evento descrito se puede presentar en la bobina de un transformador, donde el material aislante (papel) se encuentra en contacto con los elementos conductores (alambre ó fleje). Ante cualquier anomalía en dichos materiales, se incrementa la probabilidad de aparición de descargas parciales.

2.3. Tipos de descargas parciales

Con las experiencias obtenidas en los laboratorios ante las diversas fallas en los dispositivos de alta tensión, las descargas parciales se clasifican en tres tipos: superficiales, internas y externas.

2.3.1. Descargas superficiales

Las trazas o caminos que se generan en las superficies de los elementos aislantes o conductores son conocidos como descargas superficiales. En muchas ocasiones, el objetivo de los aislamientos en el transformador se ve disminuido por este tipo de descarga. La totalidad de estas descargas están relacionadas con contaminación y humedad, por esto las partes exteriores de los equipos son las más susceptibles a presentar descargas superficiales.

2.3.2. Descargas internas

Son todas aquellas descargas parciales que se producen en el interior de los materiales, por ejemplo, aquellas que se producen en las cavidades de la resina epóxica de los transformadores secos, en el aceite con partículas de granalla o la celulosa del papel debido al proceso de envejecimiento. Actualmente, se están desarrollando métodos para detectar la zona exacta del transformador donde se presentan las anomalías de este tipo.

2.3.3. Descargas externas ó corona

Los campos eléctricos pueden llegar a ionizar el aire y permitir la conducción de pulsos de corriente (descargas parciales) debido a las altas tensiones que se pueden registrar en los aisladores de un transformador. Sin lugar a duda, el efecto corona también puede generar gases que en ocasiones consiguen ser corrosivos. En el caso de los transformadores que operan con muy alta tensión, este tipo de descarga parcial puede llegar a ser devastadora.

2.4. Descripción de la prueba de descargas parciales

La prueba de descargas parciales se practica sobre máquinas estáticas ó rotativas, cables y en general a elementos de alta tensión. En este caso, se explicará cómo se efectúa la prueba de descargas parciales a transformadores eléctricos a partir del diagrama de conexiones de la figura 2.2.

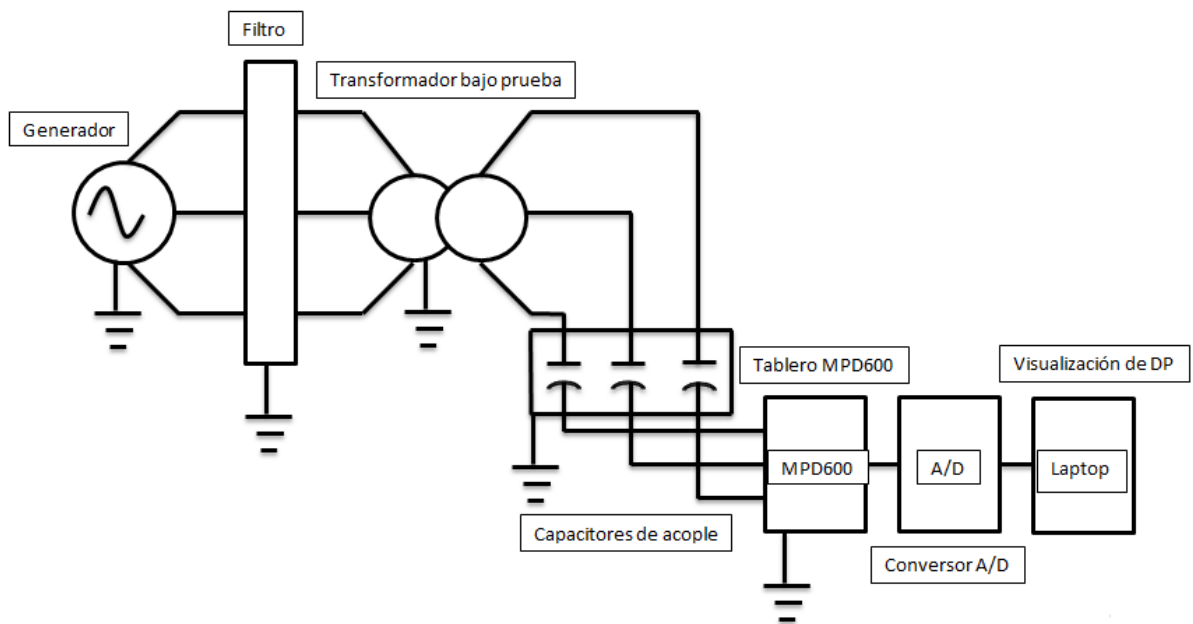


Figura 2.2 Esquema eléctrico de la prueba de descargas parciales.

Tanto el equipo bajo prueba como los elementos que intervienen en el ensayo deben estar en condiciones óptimas de limpieza y debidamente aterrizados, además es necesario cumplir otras condiciones esenciales relacionadas en la sección 2.5. Se debe contar con un generador de frecuencia variable para proveer la rutina de tensión adecuada en los terminales de baja del transformador. La rutina de tensión y el tiempo de prueba serán explicados detalladamente en la sección 2.6 y 2.7. Usualmente, entre el generador y los terminales de baja tensión, existe un filtro, cuyo propósito es mejorar la calidad de la onda aplicada al transformador y así asegurar una mayor confiabilidad de los resultados. Con los terminales de alta tensión se encuentran los capacitores de acople, los cuales brindan una conexión entre el elemento bajo prueba y el equipo de medición de descargas parciales. El equipo de medición está conectado mediante fibra óptica al equipo de cómputo

donde se visualizan y analizan los eventos de descargas parciales registrados durante la rutina.

Nota importante: Antes de iniciar la prueba, se debe calibrar todo el sistema por medio de una medida patrón proporcionada por un calibrador, el cual inyecta pulsos medidos en pC (pico-Coulomb) que a su vez son observados en el sistema de cómputo. El objetivo del proceso es calibrar el sistema con un valor de referencia, esta operación debe ser efectuada fase a fase en los terminales de alta tensión. Con lo anterior, se asegura que los datos leídos por el equipo MPD 600 correspondan a los que realmente ocurren en el equipo bajo prueba. Los capacitores de acople brindan además un camino a los eventos de descargas parciales con la intención de ser procesados en el equipo MPD600. Esta información servirá posteriormente para ser analizada en el equipo de cómputo mediante las herramientas disponibles y finalmente dictaminar las anomalías con ayuda de los patrones de DP registrados.

La figura 2.3 revela una conexión pictográfica que detalla los elementos y equipos que intervienen en la prueba de descargas parciales.

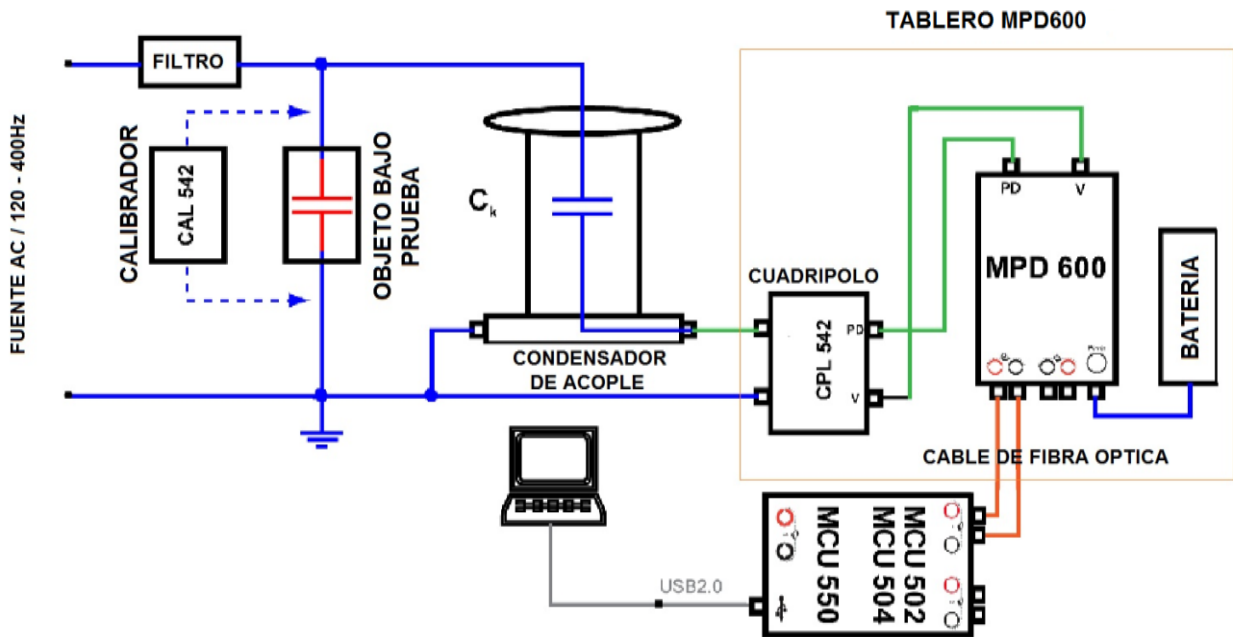


Figura 2.3 Descripción pictográfica de la prueba de descargas parciales.

A continuación se describen cada uno de los componentes presentados en la figura 2.3.

Calibrador CAL 542: se debe asegurar que los valores de descargas parciales a medir correspondan a los reales, para lograrlo, se introduce un pulso de carga definida al circuito de medida por medio del calibrador. Este pulso será detectado por el software MPD600, donde finalmente el valor medido y el aplicado corresponderán al real, esto mediante un factor de amplificación o atenuación.



Figura 2.4 Calibrador.

En la pantalla del calibrador se muestra el valor de carga a aplicar, su magnitud se puede ajustar mediante dos botones, su alimentación o suministro eléctrico se hace por medio de una batería.

Equipo bajo prueba: corresponde al transformador que será analizado. Para el análisis de los prototipos, será la celda de prueba el medio de estudio de las descargas parciales.

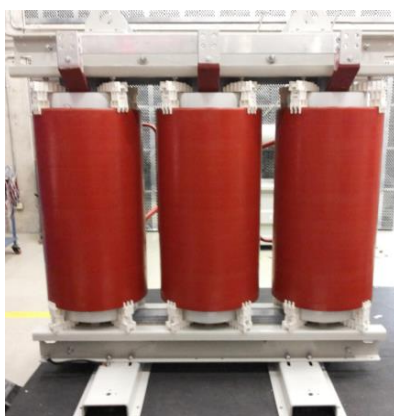


Figura 2.5 Equipo en prueba como ejemplo.

Cuadripolo CPL 542: Funciona como una impedancia externa de medición. Este contiene un diplexor de frecuencia que logra separar las señales de las descargas parciales y la tensión de prueba.



Figura 2.6 CPL542.

Equipo de medición de descargas parciales MPD 600: Este es un dispositivo altamente sofisticado que en esencia sirve de canal en la transmisión de la información desagregada por el CPL 542, esta información es emitida en forma de pulsos a través de fibra óptica, adicionalmente el módulo cuenta con una batería que apoya su labor.



Figura 2.7 MPD600.

MCU 502: Es el transmisor entre el MPD600 y el ordenador, este se emplea para emitir adecuadamente las señales entrantes de la fibra óptica hacia el ordenador. El uso de este módulo independiza el equipo de cómputo para la recepción y análisis de información mediante el software avanzado MPD600 de Omicron, adicionalmente el módulo MCU 502 está electroaislado.



Figura 2.8 MCU 502.

Condensador de acople Ck: El condensador de acoplamiento simplemente conecta el dispositivo de medida de descargas parciales con el equipo bajo prueba que se encuentra energizado.



Figura 2.9 Capacitores de acople.

2.5. Condiciones generales para la ejecución de la prueba de DP

Para la ejecución de la prueba se requiere el cumplimiento de las siguientes condiciones, de lo contrario, se deben utilizar factores de corrección descritos en la norma [2].

- Altitud: Se recomienda una altitud menor o igual a 1000 m.
- Temperatura ambiente: Esta nunca será mayor o igual a 40°C. En el caso de transformadores de tipo exterior, la temperatura no debe ser menor o igual a 25°C y no menor a -5°C para los de interiores.
- Onda sinusoidal: la distorsión que se presenta en la tensión aplicada al equipo no debe ser mayor al 5%.
- Humedad: No debe ser mayor al 93%.
- Simetría: Debe existir simetría en las tensiones para el caso de transformadores polifásicos.

La prueba no aplica para:

- Transformadores secos no refrigerados por aire, es decir cuyo método de refrigeración incluya gases u otro método diferente al convencional (aire).
- Transformadores monofásicos menores a 5 kVA.
- Transformadores polifásicos menores a 15 kVA.
- Transformadores de arranque, instrumentación, minería, soldadura y regulación de voltaje.

Para una adecuada ejecución de la prueba se deben tener en cuenta los siguientes criterios básicos:

- Los transformadores que clasifiquen para la realización de la prueba deberán estar equipados con terminales de tierra, donde todas las partes no vivas metálicas expuestas deben estar aterrizadas.
- Las descargas parciales se medirán en términos de carga aparente (pC) en conformidad con la IEC 60270.
- La medición de descargas parciales se hará después del resto de pruebas dieléctricas.

- La bobina de baja tensión debe ser alimentada por una fuente monofásica o trifásica.
- La frecuencia siempre debe estar sujeta a modificaciones estipuladas.

Las condiciones generales son normalmente instrucciones que permiten la medición real de descargas parciales. El desconocimiento o aplicación errónea de estas, pueden llevar a aceptar transformadores que no se encuentran en las mejores condiciones e incluso rechazar aquellos que son aptos para operar en un sistema Eléctrico. En esencia, existen dos normas que rigen la prueba de descargas parciales, ambas obedecen las anteriores condiciones generales para la ejecución de la prueba en cuestión.

A continuación se indicarán las dos normas que rigen la prueba de descargas parciales, se incluyen las recomendaciones para la ejecución de la prueba, rutinas de prueba, criterios de aceptación y ejemplos.

2.6. Rutina de tensión y criterio de aceptación según IEC

Según la norma, se practicarán las mediciones de descargas parciales para transformadores que incluyan devanados diseñados para operar a tensiones mayores o iguales a 3,6 kV.

2.6.1. Transformadores secos

Para la realización de la prueba es necesaria una rutina de tensión, esta puede ser ejecutada mediante un ensayo trifásico (figura 2.10) o monofásico (figura 2.11). Generalmente la prueba de descargas parciales se realiza en modo trifásico por cuestiones de tiempo, en este caso la tensión será aplicada fase a fase. Bajo el ensayo monofásico la prueba se ejecuta para cada fase, lo cual la hace ideal, cuando se requiere la verificación exhaustiva de cada bobina del transformador. En ambos casos, la frecuencia de prueba debe estar entre 120 Hz y 400 Hz.

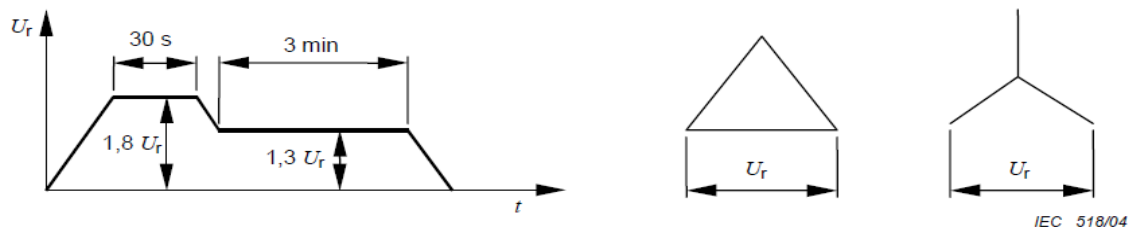


Figura 2.10 Rutina de tensión para transformadores secos trifásicos, prueba trifásica.

Para la prueba trifásica se aplica una tensión de $1,8 \cdot U_r$ (mayor tensión del transformador), con la intención de provocar la aparición de descargas parciales, esta magnitud será aplicada durante 30 s. Posteriormente se suministrará una tensión de magnitud $1,3 \cdot U_r$ durante 3 minutos (sin interrupción) donde se medirán los eventos de descargas parciales.

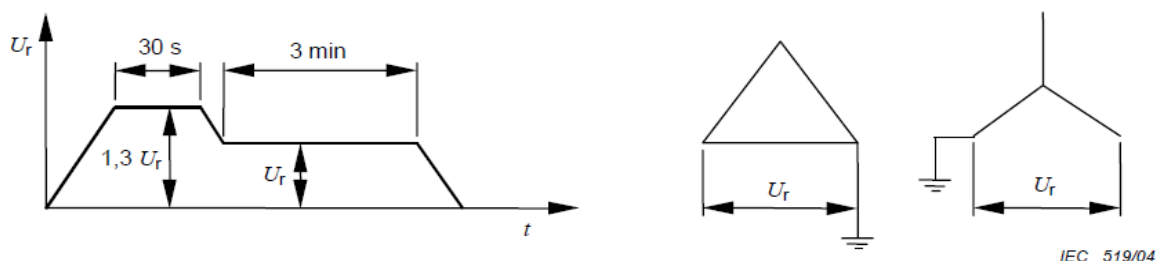


Figura 2.11 Rutina de tensión para transformadores secos trifásicos, prueba monofásica.

En el caso de la prueba monofásica se aplica una tensión de $1,3 \cdot U_r$ (mayor tensión del transformador), con la intención de provocar la aparición de descargas parciales, esta magnitud será aplicada durante 30 s. Posteriormente se suministrará una tensión de magnitud U_r durante 3 minutos (sin interrupción) donde se medirán los eventos de descargas parciales, este procedimiento debe ejecutarse para cada fase del transformador. La tabla 2.1 relaciona el criterio de aceptación de transformadores secos en la prueba de descargas parciales.

Tabla 2.1 Criterio de aceptación para transformadores secos según IEC.

Criterio de aceptación para transformadores secos según IEC
Debido a que en teoría los transformadores secos deben estar libres de descargas parciales, el único criterio para aceptación o rechazo de estos se fundamenta en que ningún evento de descarga parcial debe ser mayor a 10 pC .

Con el fin de construir una tabla apropiada que contenga la rutina de tensión a aplicar durante la prueba de descargas parciales a un transformador seco, se presenta el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1: Se practicará la prueba de descargas parciales (modo trifásico) a un transformador seco de 1250 kVA, 13800/480 V, 60 Hz. Para realizar la medición de descargas parciales en los bornes de alta tensión, se deberá aplicar un voltaje en el lado de baja tensión. Se solicita construir la tabla que relacione la rutina de tensión, basada en la siguiente información:

Tensión en los bornes de baja o $V_{fuente} = V_{BT}$ (L-L), tensión en los bornes de alta VAT (L-L), y la tensión línea-tierra a la cual están expuestos los capacitores de medida o VDP (L-T), los resultados son especificados en la tabla 2.2.

Recomendación: Usar la relación de transformación para determinar los voltajes de la prueba y la figura 2.12 como información de apoyo para la comprensión del ejemplo 1.

Tabla 2.2 Tabla de rutina de tensión para el ejemplo 1.

Trafo bajo prueba 3F		Vp[V]	13800	Frecuencia de prueba [Hz]	400	
		Vs[V]	480	Frecuencia de diseño [Hz]	60	
Tiempo	% Tensión	Vfuente=VBT (L-L)	VAT (L-L)		VDP(L-T)	
N.A	[0-180]	----	----		----	
30 segundos	180	864V	24840 V		14341,38 V	
N.A	[180-130]	----	----		----	
180 segundos	130	624 V	17940 V		10357,66 V	
N.A	[130-0]	----	----		----	

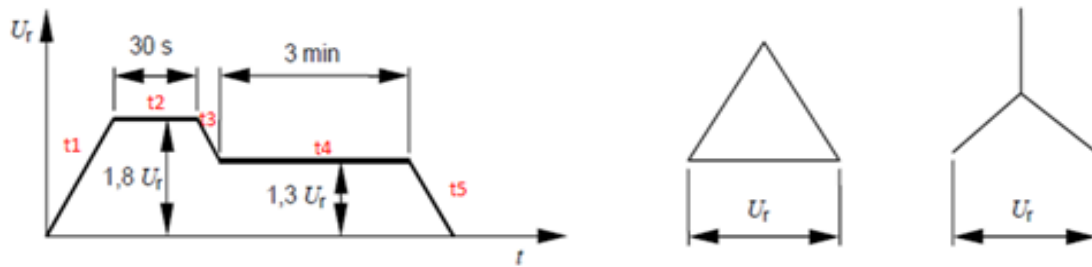


Figura 2.12 Rutina de tensión para transformadores secos, prueba trifásica, ejemplo 1.

2.6.2. Transformadores en aceite

A diferencia de los transformadores secos, los sumergidos en aceite poseen mayor probabilidad de presentar eventos de descargas parciales. La prueba de DP se puede clasificar como una prueba de rutina o especial tal como se especifica en la tabla 2.3, esto dependerá del mayor nivel de tensión de operación del transformador. A continuación se clasifica la prueba según el nivel de tensión.

Tabla 2.3 Clasificación de la prueba según el nivel de tensión.

Clasificación de la prueba de descargas parciales	$U_r \leq 72,5 \text{ kV}$	$U_r > 72,5 \text{ kV}$
	Especial	Rutina

De igual manera los transformadores en aceite poseen una rutina de tensión como se indica en la figura 2.13. Esta prueba requiere de más tiempo para su ejecución comparado con los transformadores secos, aproximadamente una hora más.

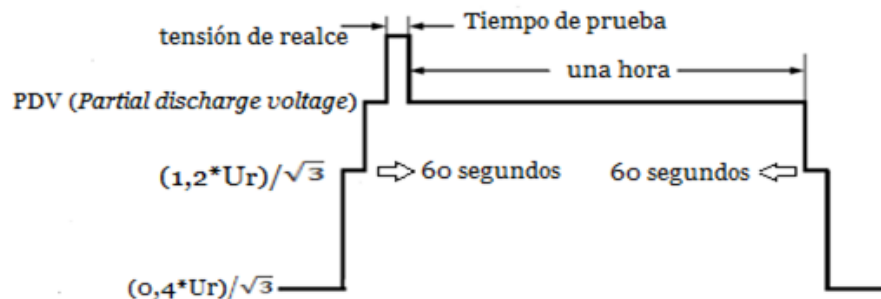


Figura 2.13 Rutina de tensión para transformadores en aceite, prueba trifásica.

Existen tres magnitudes en la rutina mostrada en la figura 2.13 que deben ser aclaradas, una de ellas es la tensión de realce o EV (*enhancement voltage*) siendo la tensión máxima durante la prueba, cuyo objetivo es excitar la aparición de DP. Existe una segunda tensión llamada PDV y es la magnitud con la cual se contemplarán los niveles de descargas parciales. La tercera, es el tiempo en el cual se aplicará la tensión EV, esta es llamada test time o tiempo de prueba (TT). Idealmente se esperaría que desapareciera cualquier rastro de descarga parcial cuando se pasa de la tensión EV a PDV. Las tensiones a aplicar se calculan a través de las siguientes ecuaciones:

$$EV = \frac{1,8 \cdot Ur}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$PDV = \frac{1,58 \cdot Ur}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

El tiempo en el cual se aplicará la tensión EV (tiempo de prueba), será calculado por medio de una expresión matemática. Se deberá tener en cuenta que existen dos ecuaciones para su cálculo; su diferencia radica en la tensión de operación del equipo.

Para tensiones menores o iguales a 800 kV, el tiempo estará definido por:

$$TT = \frac{120 \cdot \text{Frecuencia de diseño}}{\text{Frecuencia de prueba}} \quad (2.3)$$

Nota 1: el tiempo no debe ser menor a 15 segundos.

Para tensiones mayores a 800 kV, el tiempo estará definido por:

$$TT = \frac{600 \cdot \text{Frecuencia de diseño}}{\text{Frecuencia de prueba}} \quad (2.4)$$

Nota 2: el tiempo no debe ser menor a 75 segundos.

Nota 3: La frecuencia de prueba debe estar entre 120 Hz y 400 Hz.

A continuación se indican los criterios de aceptación para los transformadores sumergidos en aceite según la norma IEC, tabla 2.4.

Tabla 2.4 Criterio de aceptación para transformadores en aceite según IEC.

Criterio de aceptación para transformadores en aceite según IEC
<ul style="list-style-type: none"> • Para los transformadores sumergidos en aceite no solo se debe cumplir con un único nivel de descargas admisible, como en el caso de los transformadores secos.
<ul style="list-style-type: none"> • La prueba sólo puede ser considerada válida si el nivel de descargas parciales por ruido no excede 50 pC, tanto en el principio como en el final de la prueba.
<ul style="list-style-type: none"> • Que no ocurra un colapso en la prueba de tensión.
<ul style="list-style-type: none"> • Que ningún valor de DP mayor a 250 pC se registre durante el intervalo de una hora, ninguna tendencia a crecer, aumentos repentinos o sostenidos en los últimos 20 minutos de prueba.
<ul style="list-style-type: none"> • Los valores de DP no excedan 100 pC en la prueba con la tensión de $\frac{1,2 \cdot U_r}{\sqrt{3}}$

Con el fin de construir una tabla apropiada que contenga la rutina de tensión a aplicar durante la prueba de descargas parciales a un transformador sumergido en aceite, se presenta el siguiente ejemplo.

Ejemplo 2: Se practicará la prueba de descargas parciales (modo trifásico) a un transformador sumergido en aceite de 1000 kVA, 13800/480 V, 60 Hz. Para realizar la medición de descargas parciales en los bornes de alta tensión se deberá aplicar un voltaje en el lado de baja tensión. Se solicita construir la tabla para la rutina de tensión con la siguiente información:

Tensión en los bornes de baja o $V_{fuente} = V_{BT}$ (L-L), tensión en los bornes de alta V_{AT} (L-L), y la tensión línea-tierra a la cual están expuestos los capacitores de medida o V_{DP} (L-T), los resultados son especificados en la tabla 2.5.

Recomendación: Usar la relación de transformación y la frecuencia de diseño del

transformador para hallar los niveles de las tensiones y el tiempo de aplicación durante la prueba. Tener presente las ecuaciones (2.1) a (2.4) además de la figura 2.14 como información de apoyo para la comprensión del ejemplo 2.

Tabla 2.5 Tabla de rutina de tensión para el ejemplo 2.

Trafo bajo prueba			Vp [V]	13800	frecuencia de prueba [Hz]	400
			Vs [V]	480	frecuencia de diseño [Hz]	60
tiempo	% Tensión	Vfuente=VBT (L-L)	VAT(L-L)		VDP(L-T)	
t1	N.D	40	192	5520	3186,97	
t2	1 minuto<t1	120	576	16560	9560,92	
t3	t3=t2	158	758,4	21804	12588,55	
t4	18	200	960	27600	15934,87	
t5	60 minutos	158	758,4	21804	12588,55	
t6	1 minuto<t1	120	576	16560	9560,92	
t7	N.D	40	192	5520	3186,97	

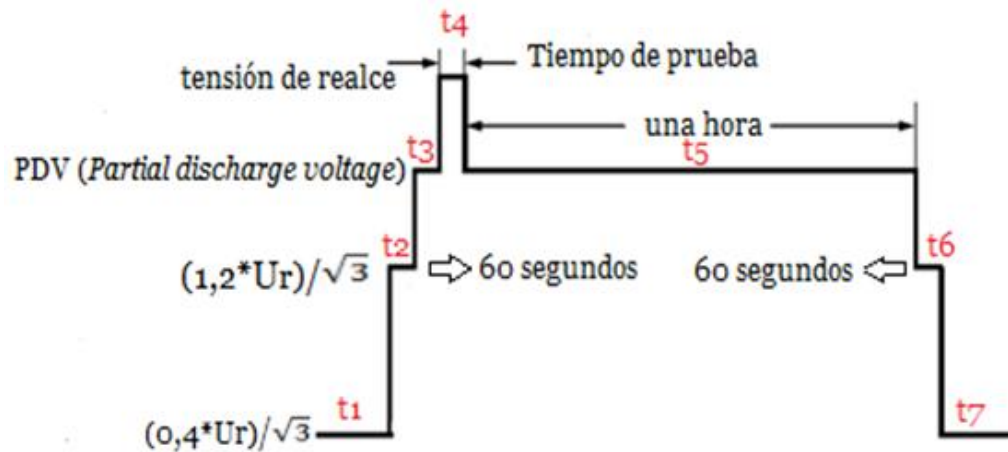


Figura 2.14 Rutina de tensión para transformador sumergido en aceite, prueba trifásica ejemplo 2.

2.7 Rutina de tensión y criterio de aceptación según ANSI-IEEE

La prueba se aplicará a transformadores que incluyan devanados diseñados para operar a tensiones mayores o iguales a 601 V.

2.7.1. Transformadores secos

La aplicación de la prueba de descargas parciales bajo la normatividad ANSI-IEEE es la misma prueba propuesta por la IEC, se usa específicamente la norma IEC 60076-11, y el estándar C57.124. Al tratarse de las mismas condiciones de prueba para ambas normas, el criterio de aceptación es el mismo, tal como se indica en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Criterio de aceptación para transformadores secos según ANSI-IEEE.

Criterio de aceptación para transformadores secos según ANSI-IEEE
Al igual que la norma IEC el único criterio para aceptación o rechazo de estos se fundamenta en que ningún evento de descarga parcial sea mayor a 10 pC .

Nota 4: Como la normatividad para el ensayo de transformadores tipo secos es la misma tanto para IEC como para IEEE, se tomará el mismo ejemplo para ambos casos, el ejemplo 1 de la sección 2.6.1.

2.7.2. Transformadores en aceite

La prueba de DP se puede clasificar como una prueba de rutina o especial, esto dependerá del mayor nivel de tensión de operación del transformador. La tabla 2.7 presenta la clasificación de la prueba según el nivel de tensión.

Tabla 2.7 Clasificación de la prueba según el nivel de tensión

Prueba dieléctrica	distribución	Potencia clase I ≤ 69 kV	Potencia clase II > 69 kV
Prueba de descargas parciales	Especial	Especial	Rutina

Para este apartado se deben considerar algunas tablas con el fin de implementar efectivamente la rutina de tensión requerida por el transformador bajo prueba. De igual manera los transformadores en aceite poseen una rutina de tensión (figura 2.15), específicamente para la prueba trifásica. Esta prueba requiere de más tiempo comparado con los transformadores secos, aproximadamente una hora más.

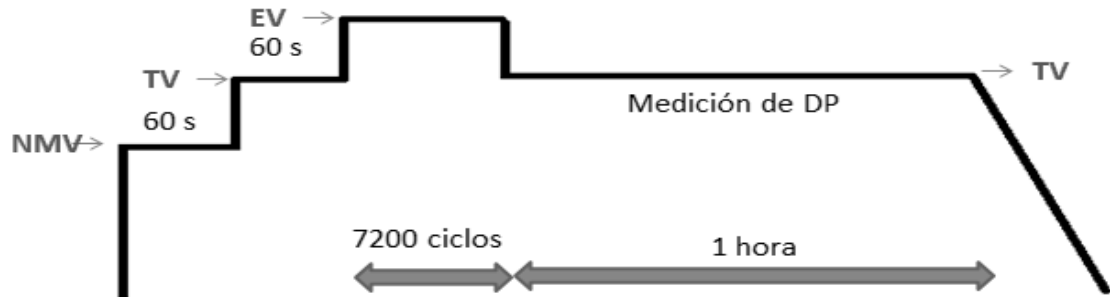


Figura 2.15 Rutina de tensión para transformadores en aceite, prueba trifásica.

Los voltajes deben ser aplicados según la rutina de tensión. Las magnitudes a aplicar vienen dadas por las siguientes ecuaciones respectivamente (Tensión de medición de ruido NMV, tensión de prueba TV y tensión de realce EV), según la figura 2.15.

$$NMV = \frac{0,5 \cdot V_{nomLL}}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

$$TV = \frac{1,58 \cdot V_{nomLL}}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

$$EV = \frac{1,8 \cdot V_{nomLL}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

Se debe tener en cuenta que:

$$V_{nomLL} = \sqrt{3} \cdot V_{aplicación} \quad (2.8)$$

A continuación, se indican los criterios de aceptación para los transformadores sumergidos en aceite según la norma ANSI-IEEE, tabla 2.8.

Nota 5: La frecuencia de prueba debe estar entre 180 Hz y 500 Hz.

Tabla 2.8 Criterio de aceptación para transformadores en aceite según ANSI-IEEE.

Criterio de aceptación para transformadores en aceite según ANSI-IEEE
Del mismo modo existen criterios de aceptación para la prueba de descargas parciales bajo la norma ANSI-IEEE. El transformador deberá ser rechazado con un solo criterio que no se cumpla, los siguientes son los criterios de aceptación:
<ul style="list-style-type: none"> • Durante el periodo de una hora no se presentan DP superiores a 500 pC.
<ul style="list-style-type: none"> • No ocurra un colapso en la prueba de tensión.
<ul style="list-style-type: none"> • los incrementos en DP no exceden 150 pC.
<ul style="list-style-type: none"> • No se presenten incrementos sostenidos en la prueba de una hora, ni incrementos súbitos durante los últimos 20 minutos.

Nota 6: La magnitud V_{nomLL} depende del voltaje de aplicación, el cual se consigue a través del manejo de tabla 2.9. Al identificar el voltaje de mayor tensión del transformador, se debe ubicar tal magnitud en la columna: “identificación”, posteriormente se podrá conocer el voltaje de aplicación en la columna contigua.

Tabla 2.9 Tensiones de identificación y aplicación para la prueba de DP según ANSI-IEEE.

Transformador de distribución y potencia clase I ≤ 69 kV	
Identificación	aplicación
1,2	1,4
2,5	2,9
5	5,8
8,7	10
15	17
25	29
34,5	40
46	53
69	80

A continuación, se presenta el ejemplo 3, con el fin de obtener la rutina de tensión a aplicar a un transformador sumergido en aceite para la ejecución de la prueba de descargas parciales.

Ejemplo 3: Se practicará la prueba de descargas parciales (modo trifásico) a un transformador sumergido en aceite de 2000 kVA, 34500/480 V, 60 Hz. Para realizar la medición de descargas parciales en los bornes de alta tensión, es necesario definir la tabla para la rutina de tensión que deberá aplicarse en el lado de baja tensión, se solicita:

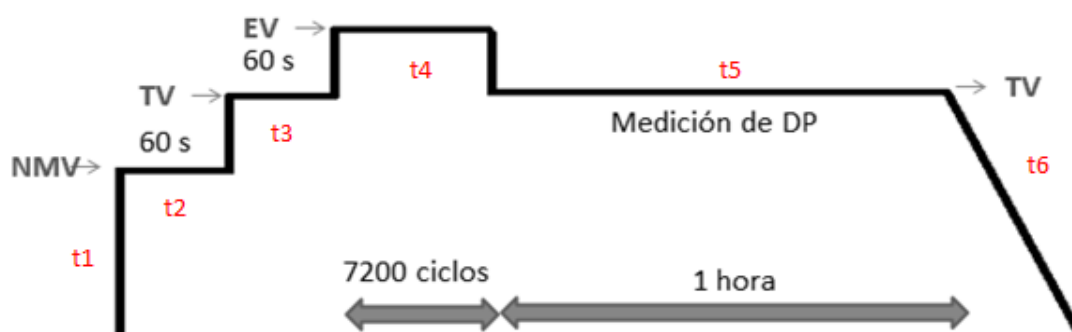
Tensión en los bornes de baja o $V_{fuente}=V_{BT}$ (L-L), tensión en los bornes de alta VAT (L-L), y la tensión línea-tierra a la cual están expuestos los capacitores de medida o VDP (L-T), los resultados son especificados en la tabla 2.10.

Recomendación: Usar la relación de transformación, la frecuencia de diseño del transformador para determinar las tensiones y tiempo a aplicar durante la prueba, se sugiere tener presente las ecuaciones de (2.5) a (2.8), además de la figura 2.16 como información de apoyo para la comprensión de este ejemplo.

La tensión de identificación es 34,5 kV, por lo tanto, la tensión de aplicación será 40 kV, tal como se indica en la tabla 2.9, tensiones de identificación y aplicación para la prueba de DP según ANSI-IEEE.

Tabla 2.10 Tabla de rutina de tensión para el ejemplo 3.

	Trafo bajo prueba		Vp [V]	34500	frecuencia de prueba [Hz]	400	V aplicación [kV] 40
			Vs [V]	480	frecuencia de diseño [Hz]	60	
	tiempo	% Tensión	Vfuente=VBT (L-L)	VAT(L-L)		VDP(L-T)	
t1	N.D	[0-50]	---	---		---	
t2	1 minuto	50	240	20000		11547,01	
t3	t3=t2	158	758,4	63200		36488,54	
t4	18 segundos	180	864	72000		41569,22	
t5	60 minutos	158	758,4	63200		36488,54	
t6	N.D	[150-0]	---	---		---	



Ejemplo 2.16 Rutina de tensión para transformadores sumergidos en aceite según ANSI-IEEE.

Al realizar un análisis comparativo entre normas, se deduce que la norma IEC es más exigente en cuanto a la magnitud permisible de la descarga parcial (en pC) comparada con la norma ANSI/IEEE. En la práctica, la norma IEC es la más empleada para la ejecución de dicha prueba.

La rutina de tensión para el caso de transformadores secos en ambas normas, es esencialmente la misma, al igual que el caso de los transformadores sumergidos en aceite, con la diferencia de que los criterios de aceptación varían entre norma y norma. Adicionalmente, la rutina de tensión para transformadores sumergidos en aceite tarda alrededor de una hora más, respecto a la prueba en transformadores secos, lo que la hace más dispendiosa.

Capítulo 3

Caracterización de patrones de descargas parciales

3.1. Introducción

Debido a la complejidad que se presenta en la identificación de las anomalías que dan origen a los patrones de descargas parciales en un transformador, es necesario crear prototipos sencillos que representen algunas características similares al transformador y que permitan analizar las características o patrones de descargas parciales. Dichos prototipos contienen errores intencionales que pueden ser habituales en el proceso de manufactura del transformador.

En este proyecto, se diseñó y construyó una celda de prueba para el análisis. Esta celda o recipiente albergaría los prototipos dispuestos para el ensayo de descargas parciales, además se garantizó un campo eléctrico homogéneo para las pruebas mediante verificación por simulación. Uno de los fines de este trabajo, es crear una base de datos con los patrones de descargas parciales para posteriores diagnósticos en transformadores eléctricos.

3.2. Presentación de la celda de prueba empleada en el laboratorio

De este modo se presenta la celda de prueba como el elemento necesario para investigar las características de DP de los prototipos. La celda de prueba debió

cumplir ciertas características para su correcto funcionamiento, específicamente homogeneidad de campo eléctrico, hermeticidad, diseño compacto para fácil maniobra, consistencia en el diseño mecánico (estructura y materiales) guardando coherencia con el modelo simulado. La siguiente es una descripción de los elementos que constituyen la celda de prueba de la figura 3.1:

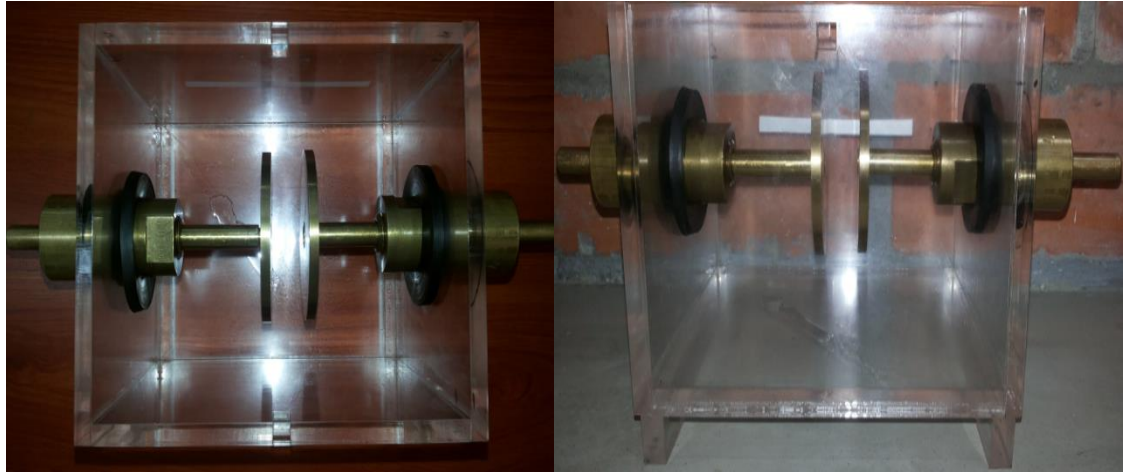


Figura 3.1 Celda de prueba para prototipos.

Un recipiente, diseñado para dar soporte al resto de elementos y contener los mismos imperfectos o prototipos propios de análisis. El material de construcción es acrílico 8mm.

Por otra parte los **émbolos de bronce (2)**, fueron diseñados para ser desplazados según los requerimientos de la prueba y soportar una diferencia de potencial entre émbolos, además estos se pueden desacoplar fácilmente.

Sellos laterales de bronce y goma, son ductos que permiten el deslizamiento de los émbolos y evitar fugas en las pruebas que requieran contener ciertos volúmenes de aceite.

Electrodos, son placas de geometría circular en bronce unidas a los émbolos. Además de generar una diferencia de potencial entre placas, estas forman un campo eléctrico constante brindado veracidad en las pruebas.

Nota 8: Usando la configuración mostrada en la figura 2.3 es posible conseguir el registro de los eventos de descargas parciales, el objeto bajo estudio es la celda de prueba con su respectivo prototipo.

3.3. Validación de la celda de pruebas

Con el fin de validar la homogeneidad del campo eléctrico generado en la celda de prueba, se realiza una simulación del mismo por medio del método de elementos finitos. Este método propone seccionar en cierta cantidad de divisiones una superficie o volumen. Estas pueden tener formas triangulares, cuadrangulares incluso en forma de poliedro en casos tridimensionales, en cualquiera de los casos las divisiones se encuentran limitadas por condiciones de contorno. Estos elementos son resueltos a través de ecuaciones diferenciales y el uso de las expresiones matemáticas que modelan los fenómenos como el campo eléctrico y magnético. Se analizarán dos posiciones de los émbolos para detallar el comportamiento del campo eléctrico como tal. Para un primer caso se presenta una longitud de 72 mm entre las caras de los electrodos, según la figura 3.2.

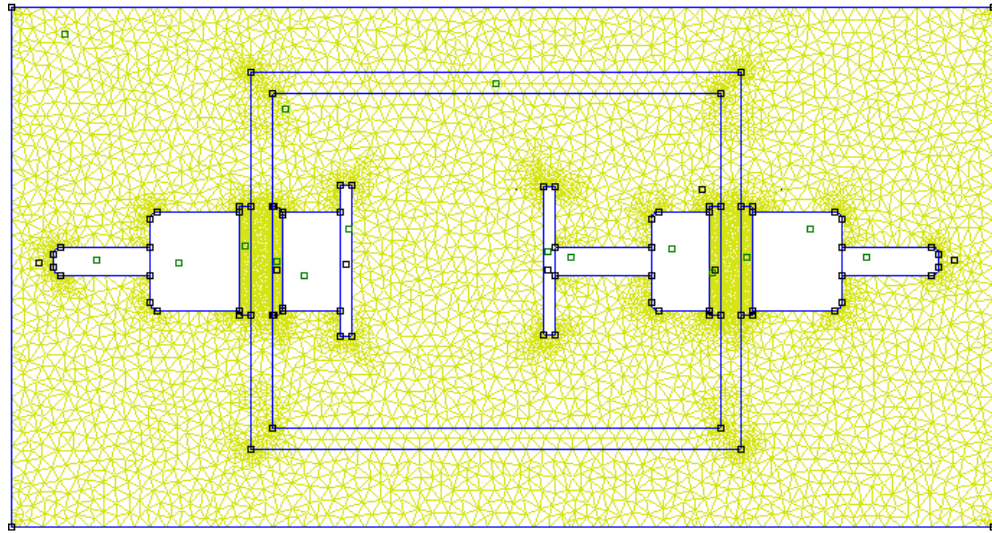


Figura 3.2 Celda de prueba en el entorno de elementos finitos.

El campo eléctrico que se presenta al aplicar una diferencia de potencial, está representado por medio de una gama de colores, donde el color amarillo representa la zona donde se presenta una mayor intensidad de campo, figura 3.3.

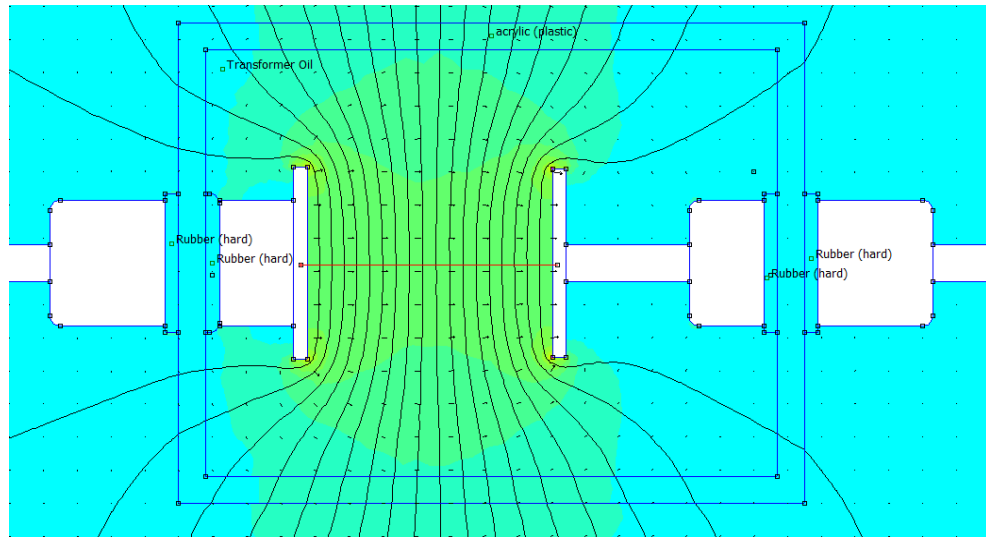


Figura 3.3 Campo eléctrico generado.

La magnitud del campo eléctrico generado a través del gap de 72 mm presenta un valle tal como indica la figura 3.4, este efecto hace poco constante el campo generado entre las placas de los electrodos.

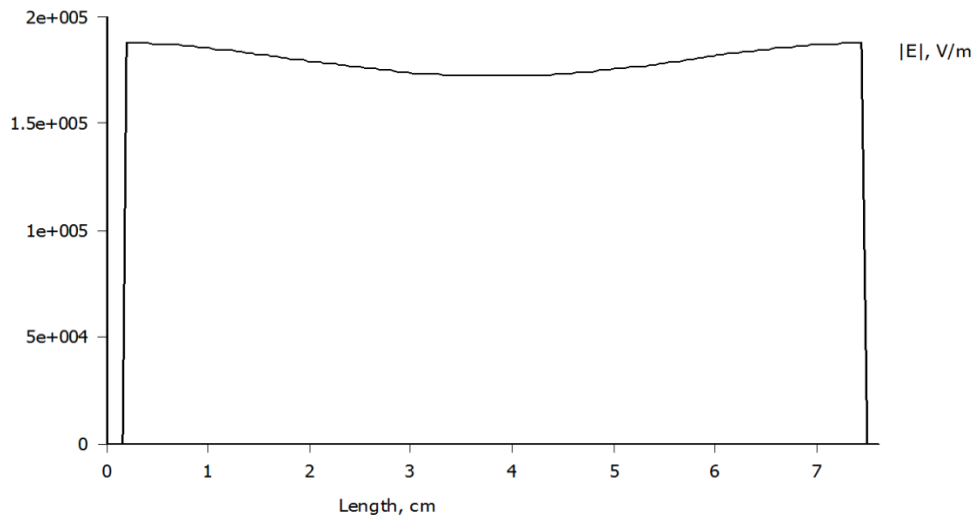


Figura 3. 4 Campo eléctrico entre electrodos.

Se debe presentar un segundo caso que permita interpretar el comportamiento del campo eléctrico cuando se realiza un desplazamiento de los émbolos. Se debe recordar que para el estudio de descargas parciales basado en prototipos, es necesario garantizar un campo eléctrico constante en la zona común entre los

electrodos. De este modo se realiza una segunda verificación del campo eléctrico, ante una longitud menor entre electrodos de 22,5 mm, según la figura 3.5. En las figuras 3.6 y 3.7 se detalla el comportamiento del campo eléctrico.

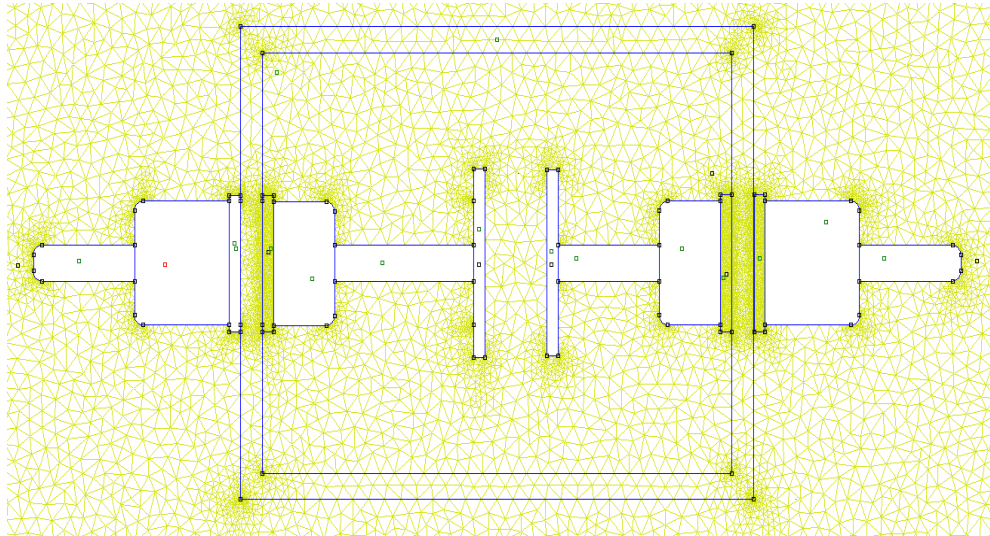


Figura 3. 5 Celda de prueba en el entorno de elementos finitos.

Al igual que en la figura 3.3, el campo eléctrico que se presenta al aplicar una diferencia de potencial está representado por medio de una gama de colores, donde el color amarillo representar la mayor intensidad de campo.

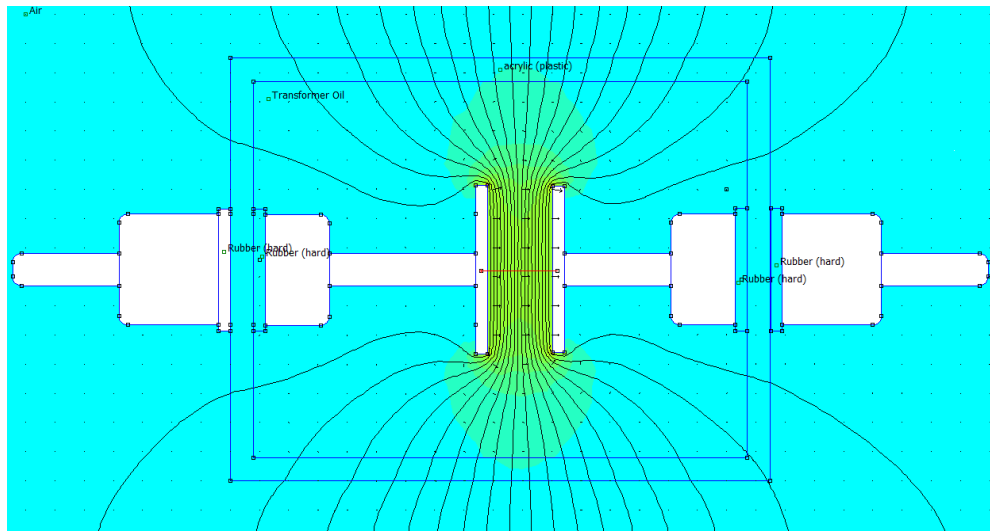


Figura 3. 6 Campo eléctrico generado.

La magnitud del campo eléctrico generado a través del gap de 22,5 mm es de carácter constante como se muestra en la figura 3.7, propicio para el estudio de descargas parciales mediante el uso de prototipos.

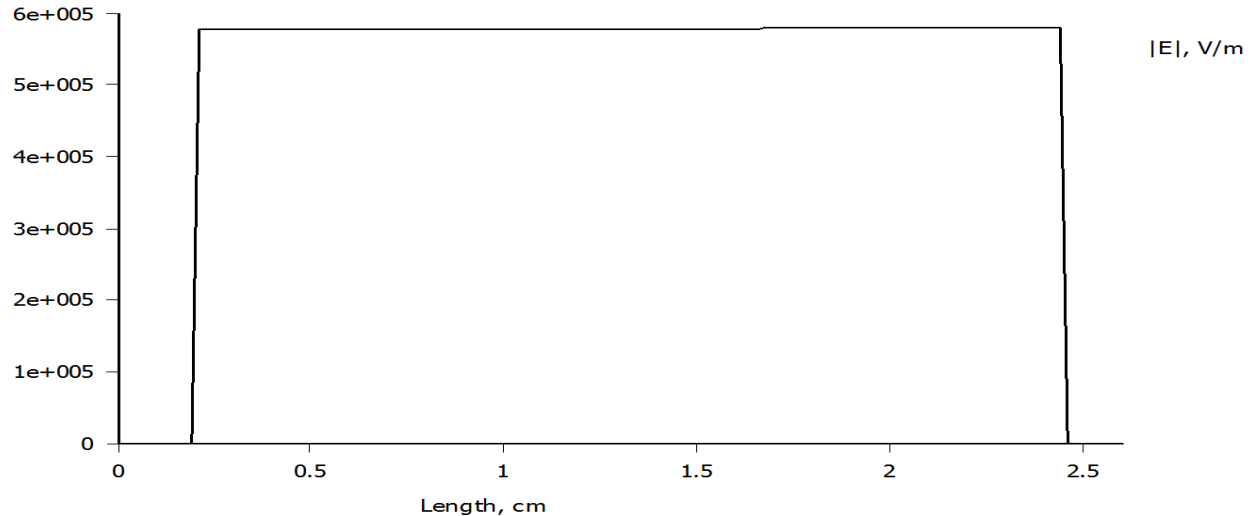


Figura 3. 7 Campo eléctrico entre electrodos.

A partir de las anteriores verificaciones se puede comprobar que la concentración del campo eléctrico entre émbolos es más intenso y constante en el segundo caso (gap 22,5 mm). Se concluye que los émbolos deberán estar separados a una distancia semejante a la registrada en la figura 3.6, con el fin de realizar la caracterización de descargas parciales a los prototipos de forma adecuada.

3.4. Obtención de patrones de descargas parciales DP

Con el objetivo de obtener los patrones de descargas parciales en la celda de prueba,

se realiza la conexión de la figura 2.3. Para este caso el objeto bajo prueba corresponde a la celda que alberga los diferentes prototipos a analizar. Los prototipos que se escogieron corresponden en su mayoría a errores que se presentan en el proceso de manufactura o en los materiales usados en la elaboración de los transformadores, entre ellos se encuentran: perforaciones y sesgos en el papel, alteración entre distancias de partes vivas y tierra, excedentes de pócima y cintas en el papel, entre otras.

La rutina de tensión que se aplica corresponde a la indicada en la figura 3.8. Durante el recorrido de esta rutina, se registran los eventos de descargas parciales

que se vayan presentando en el equipo de medición y se almacenan en el equipo de cómputo para posteriores análisis.

Existen cuatro formas en las cuales se pueden visualizar los patrones de DP en el plano cartesiano del equipo de cómputo: unipolar lineal, unipolar logarítmica, bipolar lineal y bipolar logarítmica. En este proyecto todos los patrones serán visualizados en la forma bipolar lineal.

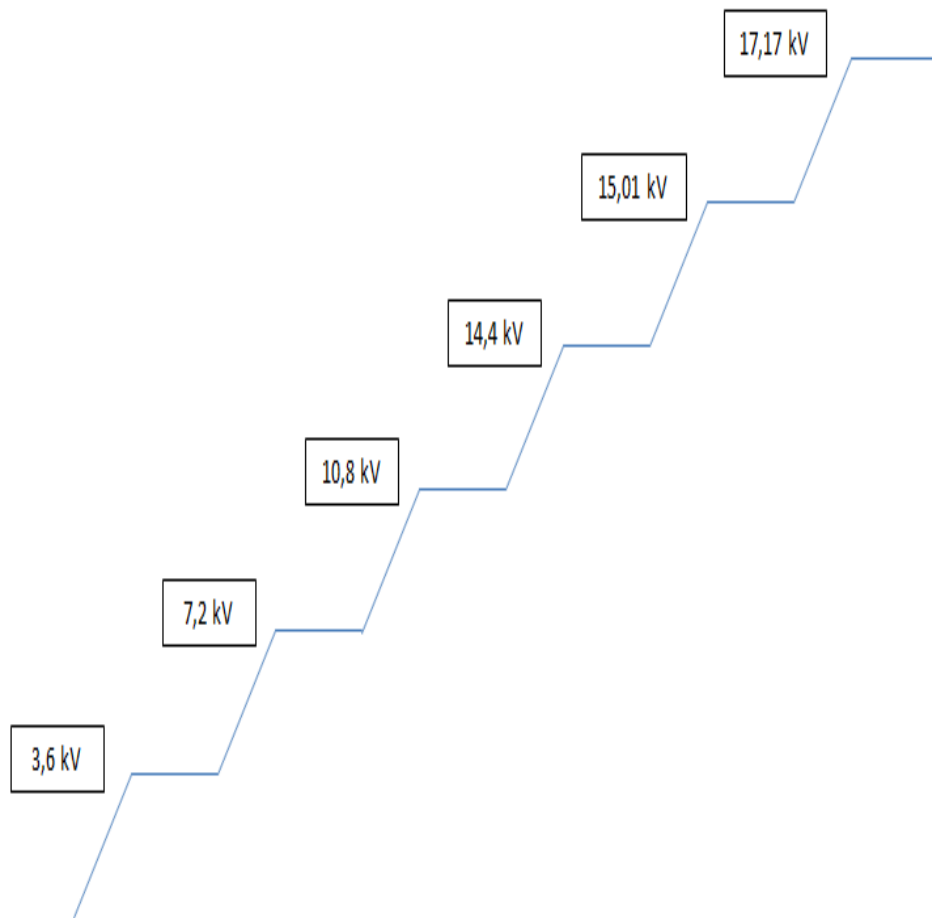


Figura 3. 8 Rutina de tensión para estudio de prototipos en la celda de prueba.

A continuación, se presentan los patrones de descargas parciales obtenidos con la celda, asociados directamente a su fuente o anomalía. Adicionalmente se incluyen las características físicas del ensayo y las respectivas magnitudes máximas de descargas parciales obtenidas, una vez se aplicada la rutina de tensión descrita en 3.8.

Los patrones correspondientes a los prototipos 9 y 10 corresponden a pruebas realizadas a un transformador seco de 300 kVA.

a. Prototipo 1: Papel entre electrodos con cavidad regular en aceite:

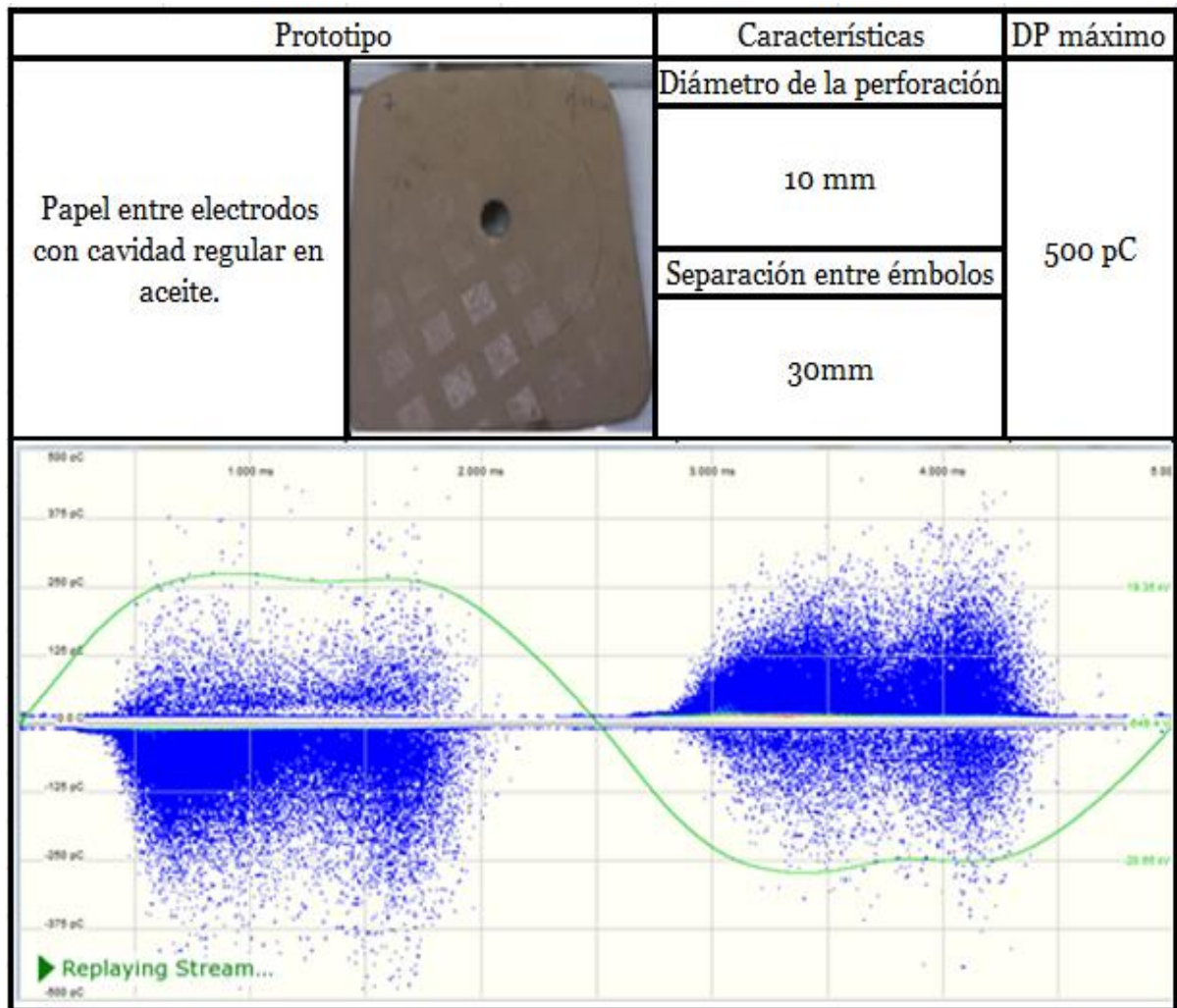


Figura 3. 9 Descargas parciales prototipo #1.

Este prototipo #1 entrega un registro de descargas parciales, donde el eje de las abscisas corresponde al desplazamiento en radianes de un ciclo de la tensión aplicada (línea verde) y el eje de las ordenas, concierne a la medición de eventos de descargas parciales en pC (pico-Coulomb). En este caso, el registro de DP se concentra en $\pi/2$ y $3\pi/2$ y guarda un índice de simetría, tanto en la parte positiva como negativa del ciclo de tensión.

b. Prototipo 2: Papel entre electrodos con cavidad regular en aceite:

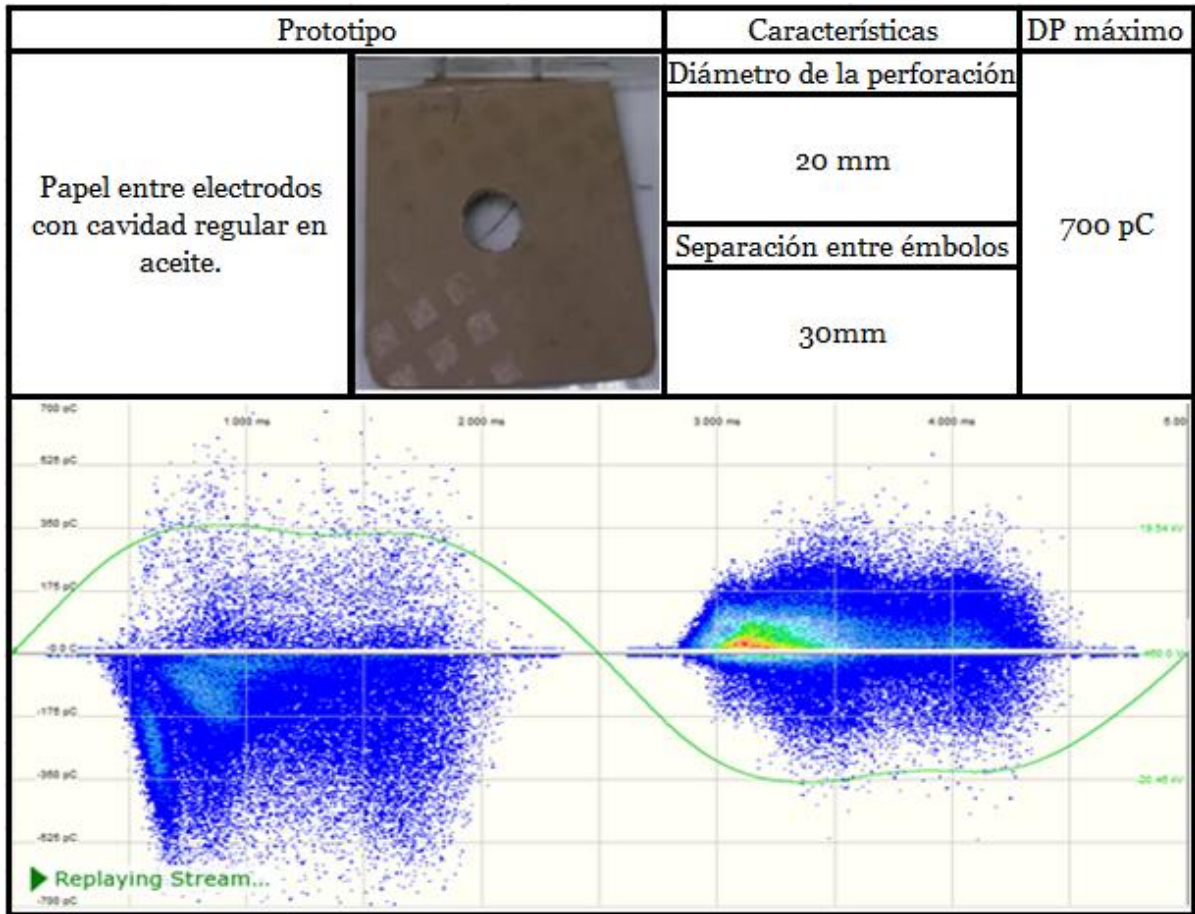


Figura 3. 10 Descargas parciales prototipo #2.

Este prototipo #2 entrega un registro de descargas parciales alrededor de $\pi/2$ y $3\pi/2$. Respecto al caso anterior, este presenta un menor grado de simetría entre la parte positiva y negativa del ciclo de tensión, además se puede observar mayor intensidad en las descargas con la presencia de colores rojos y verdes. El prototipo estudiado, corresponde a una cavidad regular en el papel dieléctrico, con un diámetro mayor comparado con el caso #1, por lo tanto el nivel de descargas parciales se incrementa en el prototipo #2. Se determina que para las cavidades en los materiales, el registro de DP ocurre en la misma posición del sistema coordenado.

c. Prototipo 3: Papel entre electrodos con cavidad irregular en aceite I:

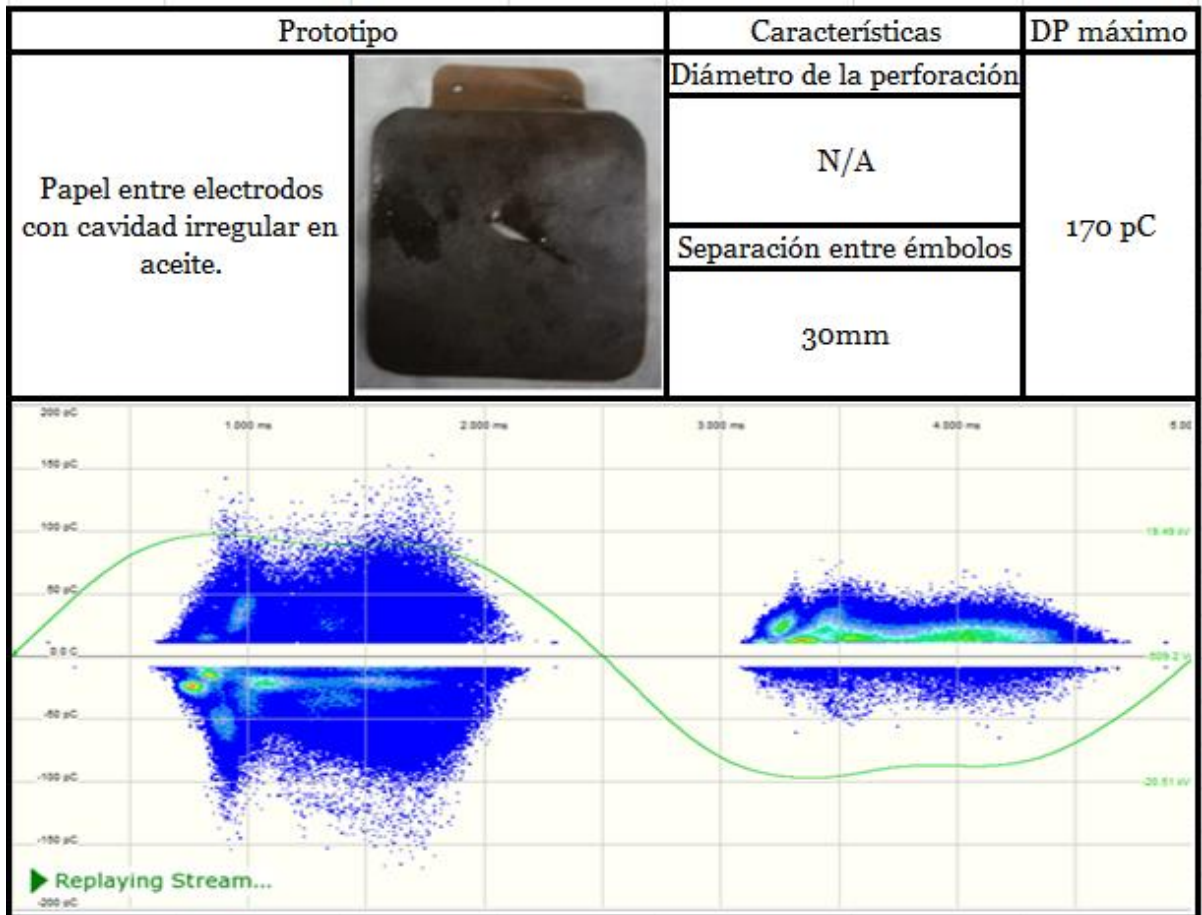


Figura 3. 11 Descargas parciales prototipo #3.

Este prototipo #3 entrega un registro de descargas parciales alrededor de $\phi/2$ y $3*\phi/2$, aunque este prototipo obedece a una cavidad, el índice de simetría entre la parte positiva y negativa del ciclo de tensión es mucho menor respecto a los dos casos anteriores, reflejando una irregularidad en la imperfección del papel. Adicionalmente existe una mayor intensidad en las descargas reflejado mediante colores verdes.

d. Prototipo 4: Papel entre electrodos con cavidad irregular en aceite II:

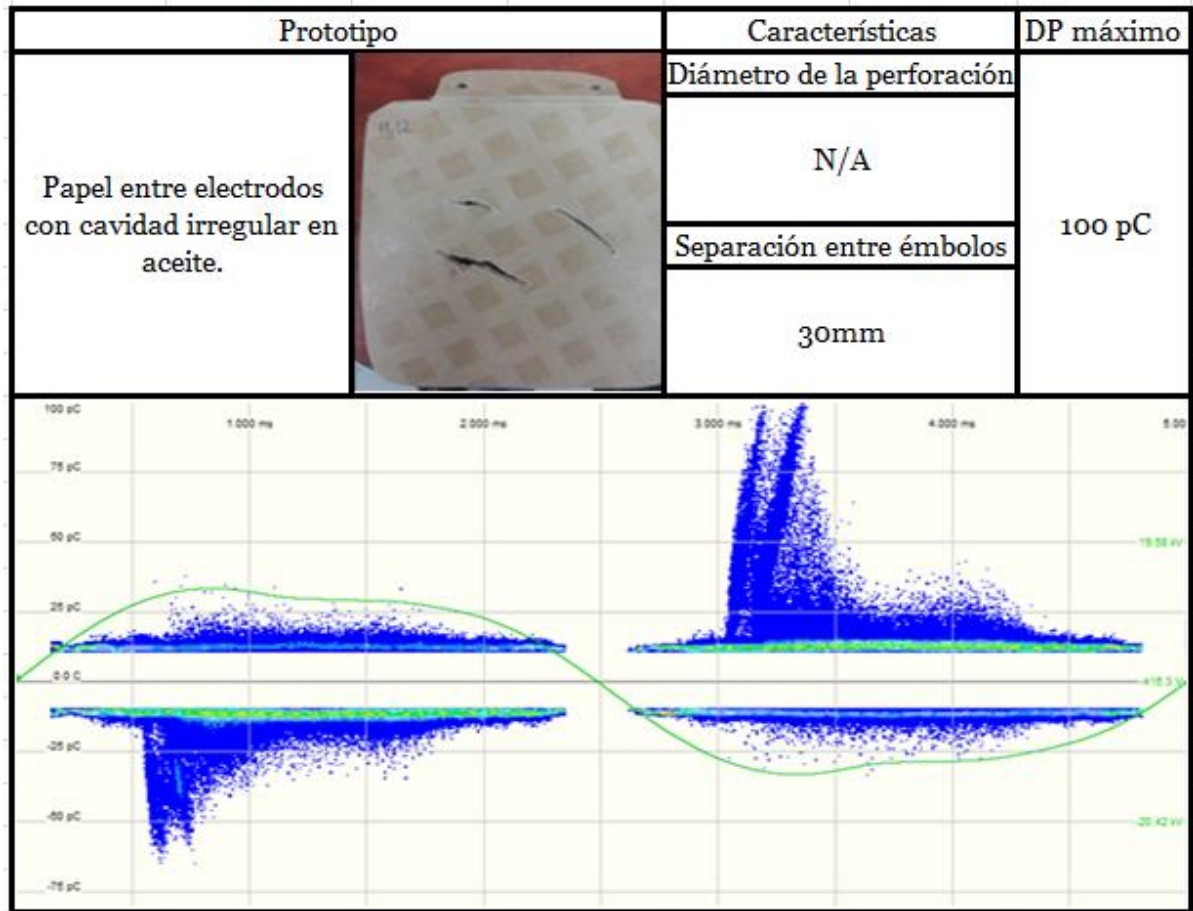


Figura 3. 12 Descargas parciales prototipo #4.

Este prototipo # 4 entrega un registro de descargas parciales alrededor de $\phi/2$ y $3*\phi/2$, aunque este prototipo obedece a una cavidad, el índice de simetría entre la parte positiva y negativa del ciclo de tensión es mucho menor respecto a los casos anteriores, lo cual refleja una irregularidad severa en la imperfección. De este modo se determina la relación entre la forma de la anomalía y la simetría de las descargas parciales. Adicionalmente existe una mayor intensidad en las descargas con la presencia de colores verdes.

e. Prototipo 5: Sesgo regular en papel inmerso en aceite:

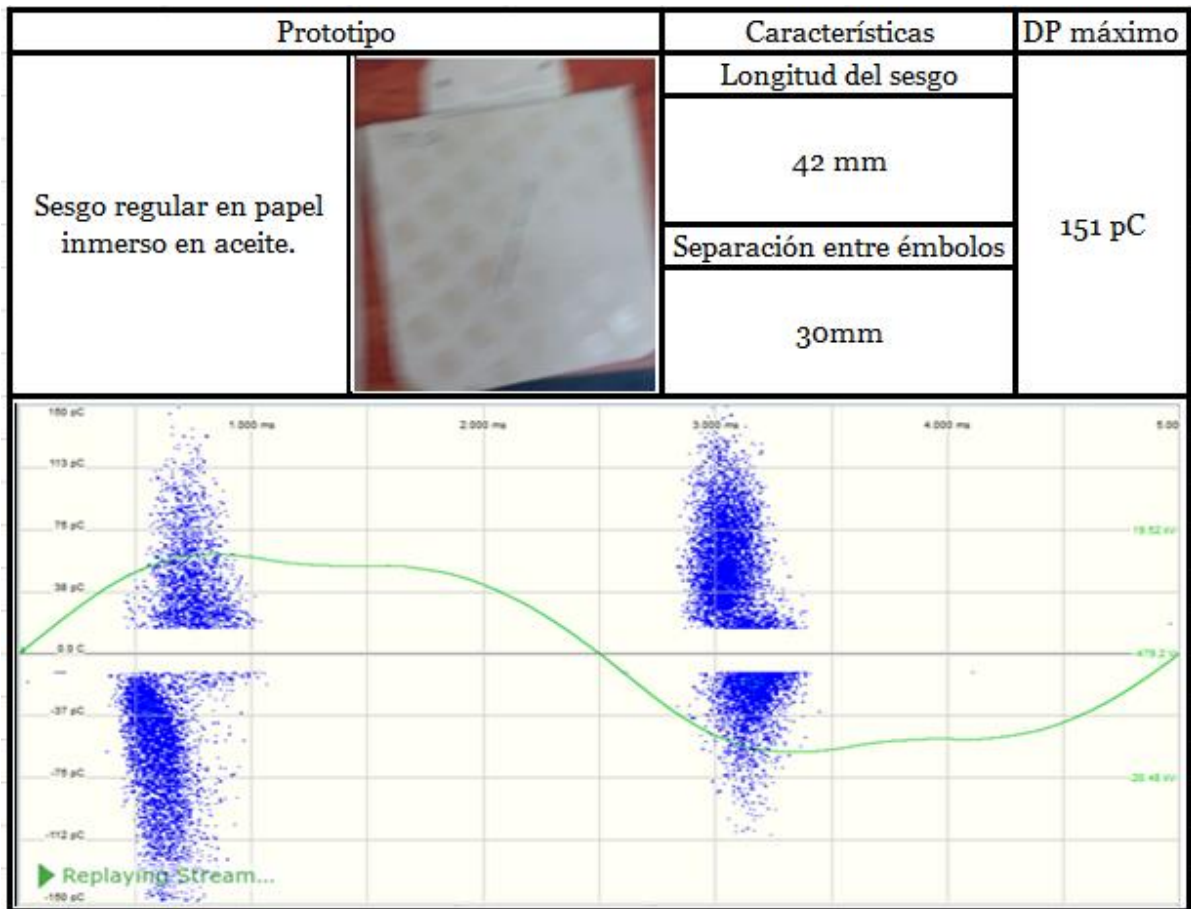


Figura 3. 13 Descargas parciales prototipo #5.

Este prototipo #5 entrega un registro de descargas parciales un poco más distante de los puntos de referencia $\phi/2$ y $3\phi/2$. Este patrón empieza a ser común en las imperfecciones que contienen sesgos en los materiales. Se observa también que el grado de dispersión de DP en el plano coordenado es bajo.

f. Prototipo 6: Papel con cinta y cavidades con aire:

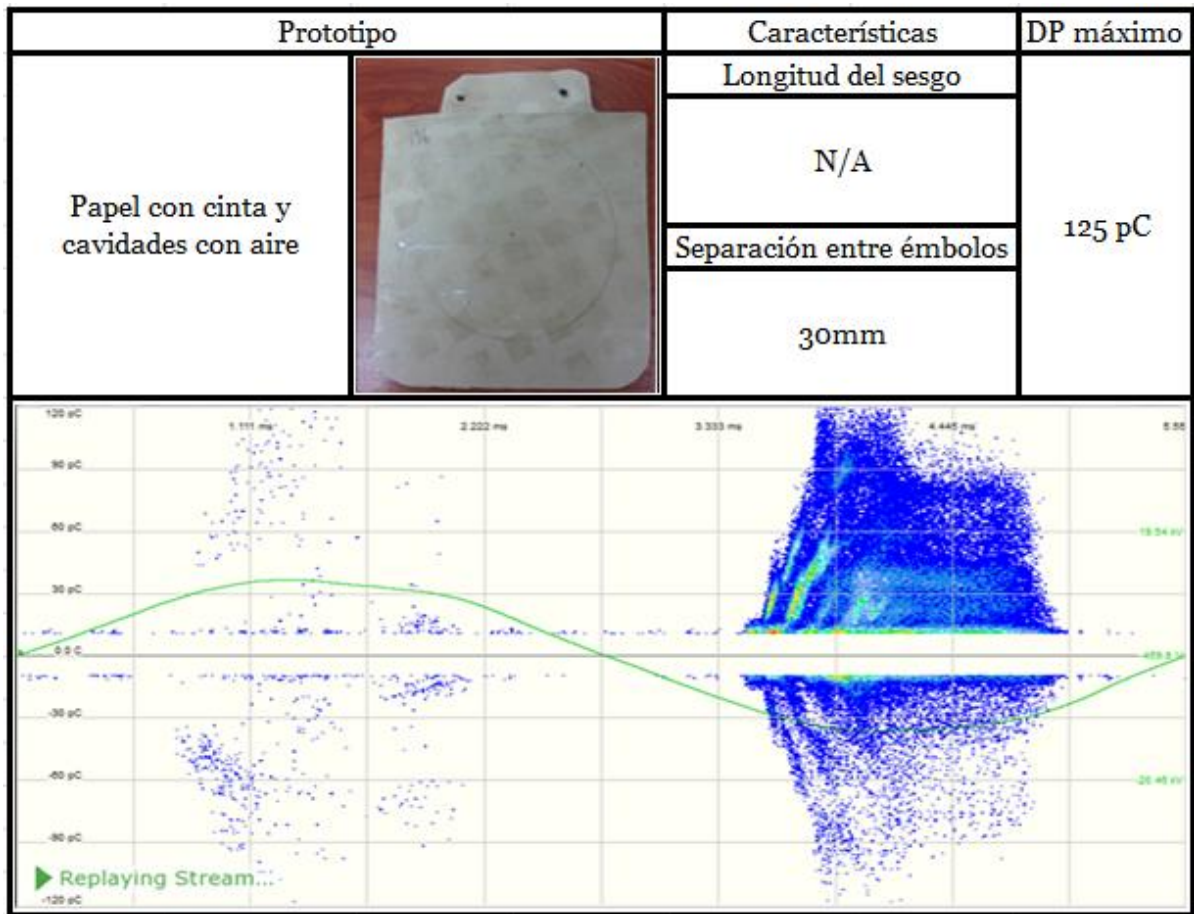


Figura 3. 14 Descargas parciales prototipo # 6.

En el proceso de manufactura específicamente en el bobinado, la cinta se hace indispensable para dar sujeción o guía durante la ejecución del bobinado, en ciertos casos las cintas permite el atrapamiento de aire distorsionando el campo eléctrico. En este caso se puede observar una gran actividad de descargas parciales en las cercanías del $3 \cdot \phi / 2$ como referencia.

g. Prototipo 7: Papel con pócima y cavidades de aire:

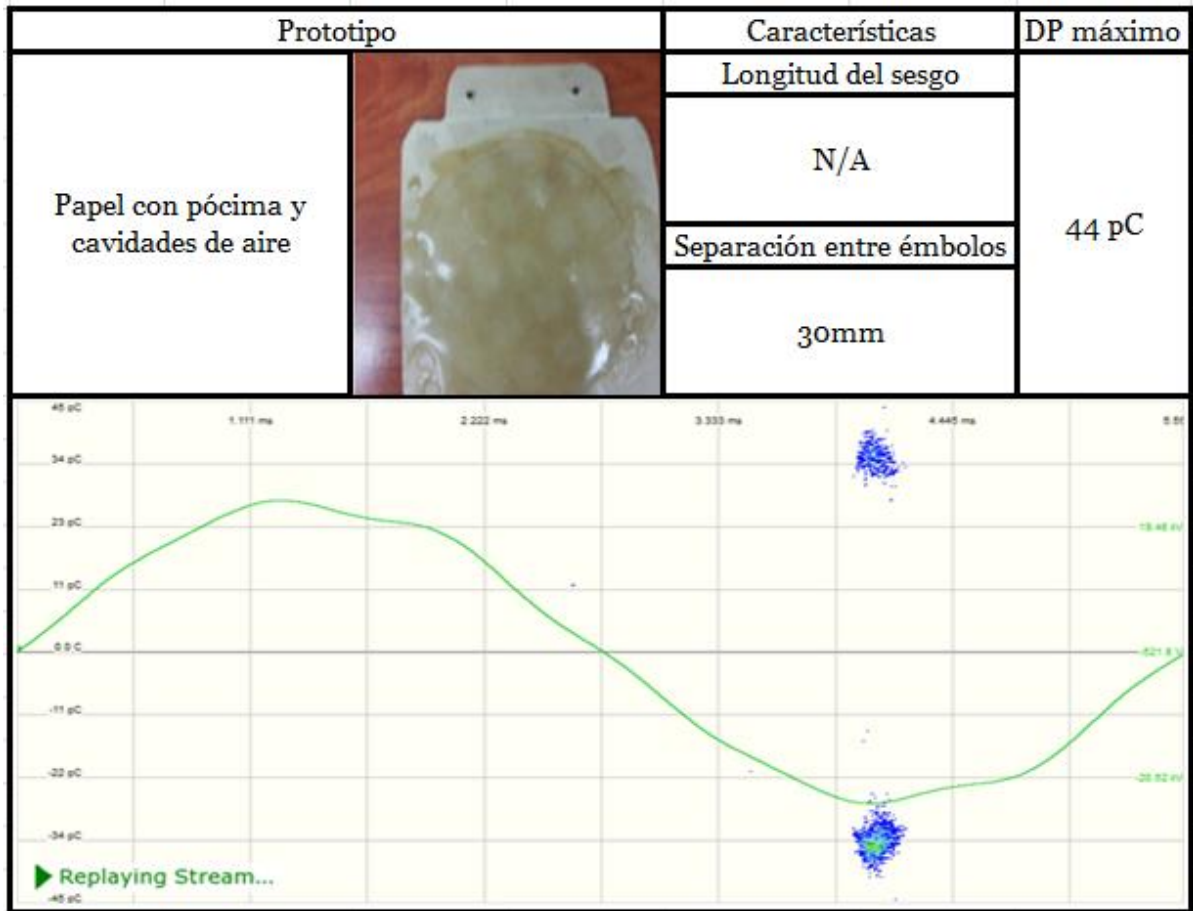


Figura 3. 15 Descargas parciales prototipo # 7.

En el proceso de manufactura se utilizan ciertos materiales para dar sujeción a los elementos, entre ellos existe un tipo de pegante llamado pócima. Este material posee partículas de aire que alteran la constante dieléctrica del mismo. Las consecuencias repercuten en las distorsiones del campo eléctrico y la posibilidad de aparición de eventos de descargas parciales. En este caso el patrón de DP se sitúa en dos cuadrantes del sistema coordenado tomando como referencia $3 \cdot \phi / 2$.

h. Prototipo 8: Suciedad en el papel:

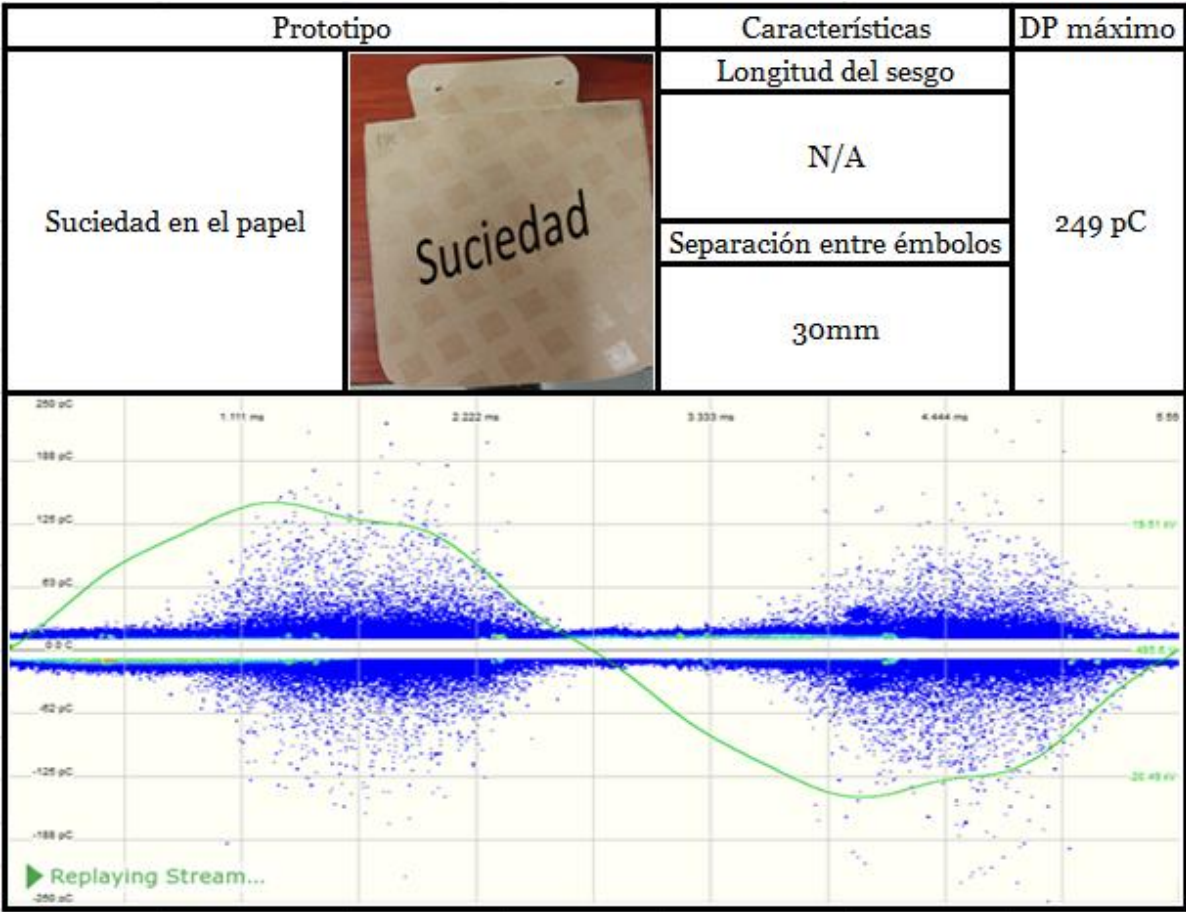


Figura 3. 16 Descargas parciales prototipo # 8.

Este caso corresponde a las descargas superficiales. Durante todo el proceso de manufactura de un transformador, la contaminación del material es un riesgo inminente, debido a la manipulación de bobinas, transporte de las mismas, impregnación de los materiales por sustancias ajenas, entre otros. Es por esto, que los procesos de manufactura, en lo posible, deben realizarse en ambientes limpios y con la manipulación adecuada de los materiales. El prototipo obtenido ante la presencia de suciedad en el papel, registra eventos de descargas parciales de magnitud considerable, especialmente entre $\phi/2$, ϕ y $3\phi/2$, 2ϕ . Este tipo de DP debe ser atendido con especial cuidado en la cadena productiva.

i. Prototipo 9: Elemento conductor contra fase:

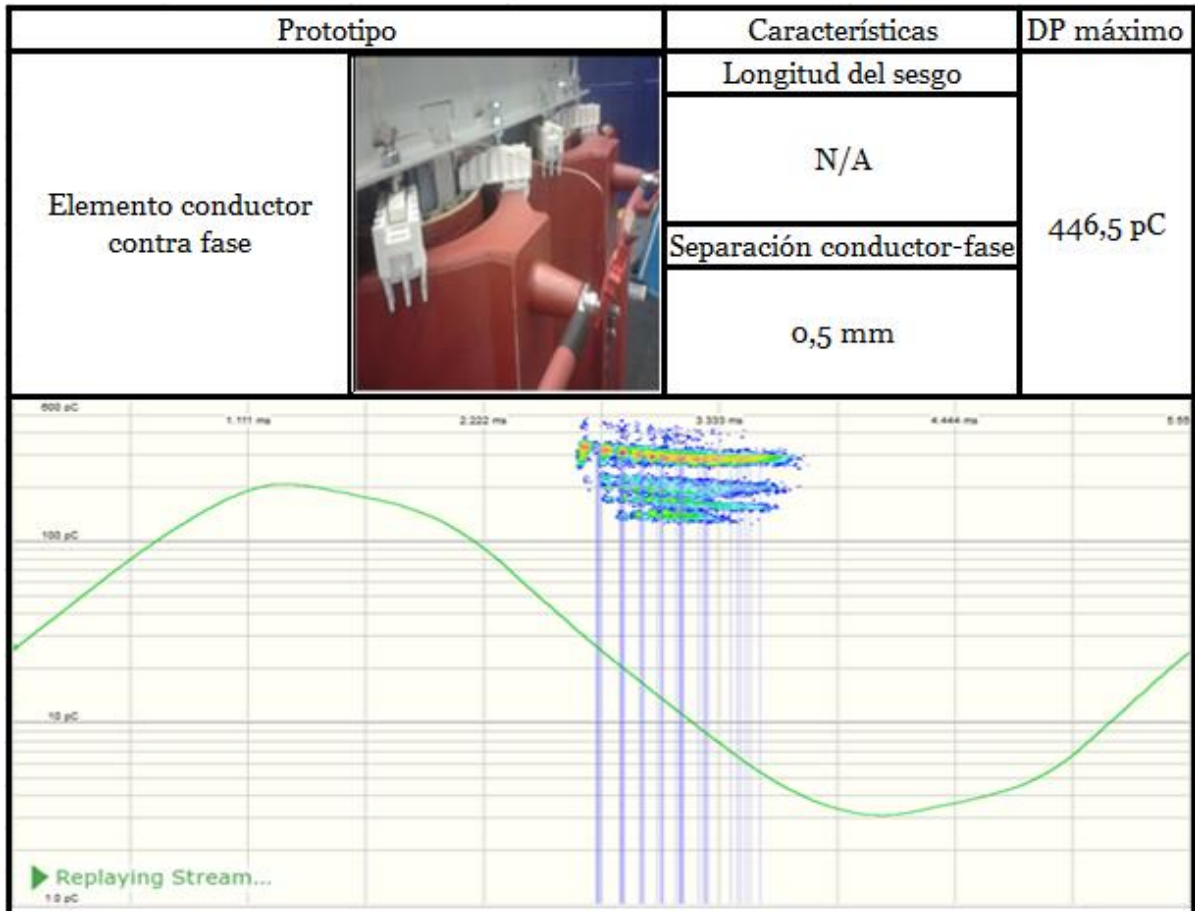


Figura 3. 17 Descargas parciales prototipo # 9.

En algunas ocasiones los transformadores están expuestos a estos tipos de anomalías. Este es un modelo propicio para encontrar el patrón de descargas parciales cuando un elemento conductor que está unido a tierra se encuentra cerca de una fase. Se registra de este modo un patrón con altos niveles de descargas parciales, ubicado en ϕ como referencia. Adicionalmente se registra una intensidad considerable según la gama de colores mostrada. En este caso se utilizó un transformador seco clase F y un conductor para tal estudio.

j. Prototipo 10: Elemento conductor contra neutro:

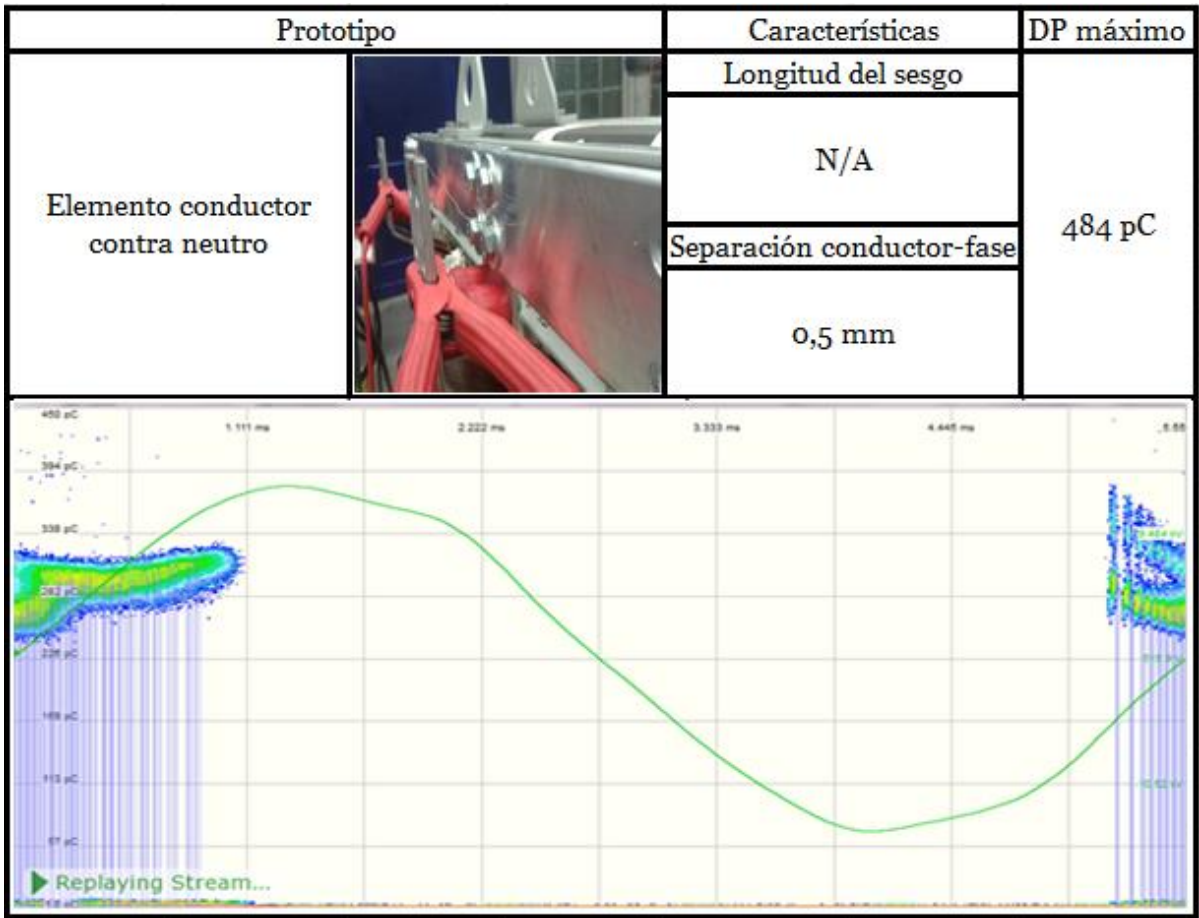


Figura 3. 18 Descargas parciales prototipo # 10.

Como en el caso anterior, en algunas ocasiones los transformadores están expuestos a estos tipos de anomalías. Este es un modelo propicio para encontrar el patrón de descargas parciales que se presenta, cuando un elemento conductor que hace parte de una fase está cerca al punto neutro del sistema de conexiones. Se registra de este modo un patrón con altos niveles de descargas parciales ubicado en las cercanías de 0 y 2π como referencias, adicionalmente una intensidad apreciable según la gama de colores mostrada. En este caso se utilizó un transformador seco clase F y un conductor para tal estudio.

Al analizar los diferentes prototipos obtenidos ante diferentes causas, se concluye que los casos más críticos en una prueba de descargas parciales, corresponden a elementos conductores flotantes cercanos y a diferentes potenciales. Las

perforaciones regulares en los materiales como el papel dieléctrico, también son determinantes en el resultado de la prueba de DP.

Capítulo 4

Simulación y análisis electrostático de un transformador

4.1. Introducción

Se presenta a continuación un conjunto de simulaciones de un transformador que reflejan los fenómenos electrostáticos en presencia y ausencia de imperfectos que pueden causar descargas parciales. El estudio se realiza por medio del programa gratuito de elementos finitos FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), [10].

4.2. Comportamiento ideal del campo eléctrico

Se simula un transformador trifásico de 500 kVA sumergido en aceite con el fin de obtener las características electrostáticas del equipo. En este caso, el transformador se encuentre libre de fuentes de descargas parciales. La figura 4.1 corresponde al enmallado que realiza el software FEMM para el respectivo análisis. Se deben cuidar todos los aspectos electrostáticos que puedan afectar un adecuado funcionamiento del transformador, como el aterrizaje del núcleo de la parte activa del equipo.

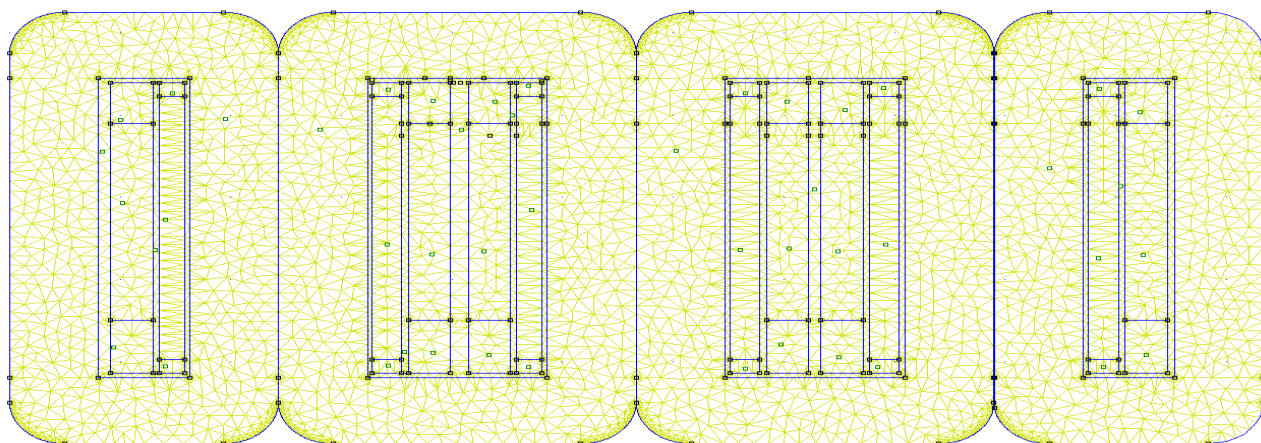


Figura 4.1 Enmallado de un transformador trifásico.

Un aterrizaje insuficiente del núcleo permite una dispersión del campo eléctrico, tal como se observa en el segundo y tercer lazo del transformador de la figura 4.2, conduciendo a posibles descargas parciales. El campo eléctrico debe estar lo más confinado posible si se desean evitar focos de DP.

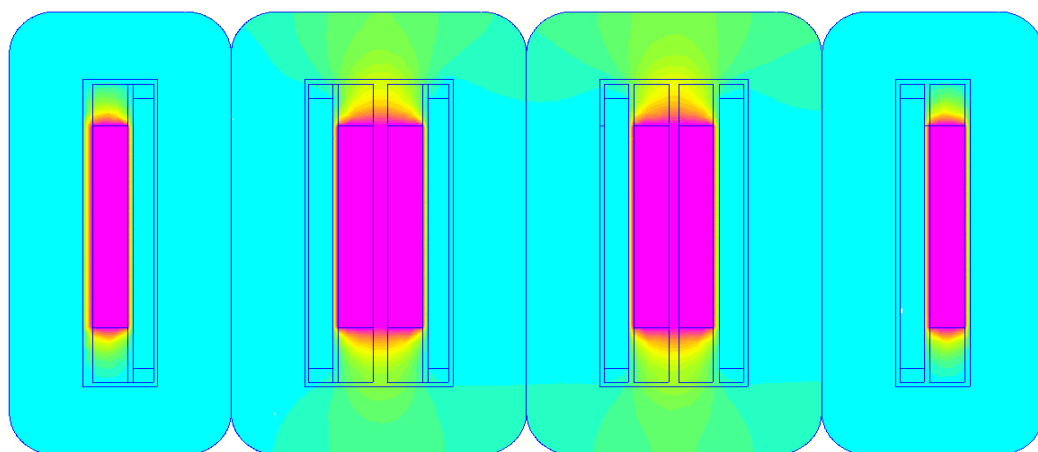


Figura 4.2 Comportamiento electrostático del transformador sin aterrizar completamente.

La figura 4.3 muestra el comportamiento electrostático del equipo una vez el núcleo del transformador es aterrizado. Las líneas equipotenciales y el campo eléctrico se confinan, estableciendo un panorama más seguro en el objetivo de evitar eventos de DP. Las imperfecciones, errores de diseño y demás situaciones

que ocurren en el proceso de manufactura del transformador, introducirán efectos de distorsión al campo eléctrico, posibilitando la aparición de descargas parciales.

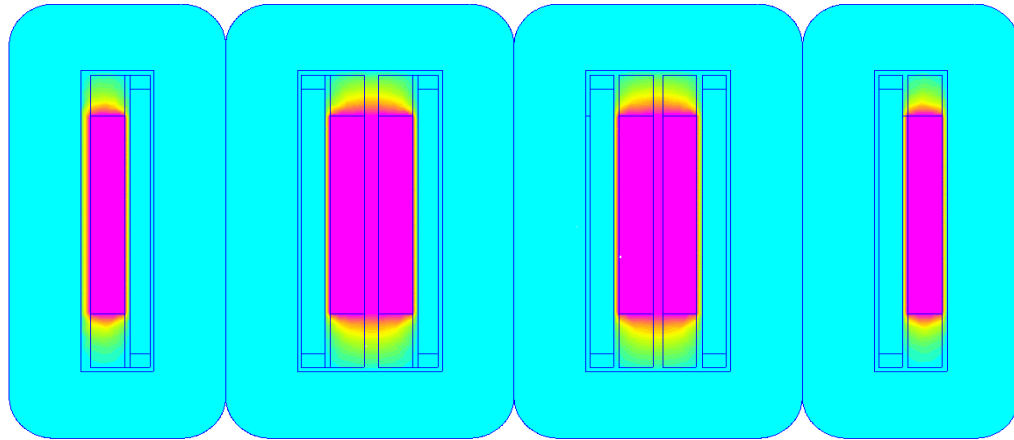


Figura 4.3 Comportamiento electrostático del transformador aterrizado completamente.

La figura 4.4 muestra la uniformidad de las líneas de campo eléctrico bajo condiciones ideales del transformador. Al no contar con anomalías en el equipo, el registro de distorsiones o estrés electrostático es casi nulo, dicho estrés generalmente se evidencia bajo la acumulación de líneas equipotenciales en una o más regiones. Todas las fuentes de descargas parciales tienden a ser mucho más peligrosas y devastadoras a medida que las tensiones de operación incrementan.

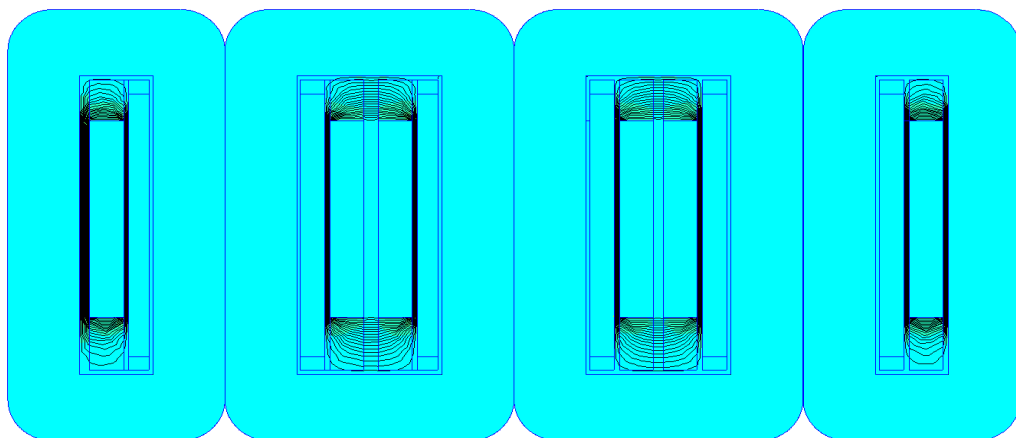


Figura 4.4 Líneas de campo eléctrico del transformador aterrizado completamente.

4.3. Comportamiento real del campo eléctrico

El mismo transformador analizado en la sección anterior es ahora simulado con algunas imperfecciones, esto con el propósito de notar el efecto de distorsión sobre el campo eléctrico.

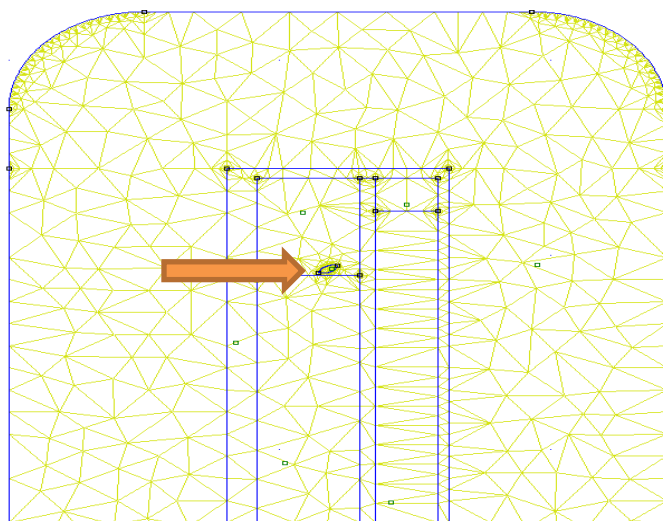


Figura 4.5 Enmallado de la sección con anomalía tipo perforación en papel.

Para esta situación se analiza en primera instancia una perforación en el papel ubicada dentro del cabezal de la bobina de alta tensión. Se espera que el campo eléctrico asociado se vea afectado por esta imperfección, reflejando una distorsión en las líneas equipotenciales. Los colores indican la intensidad del campo eléctrico en el espacio.

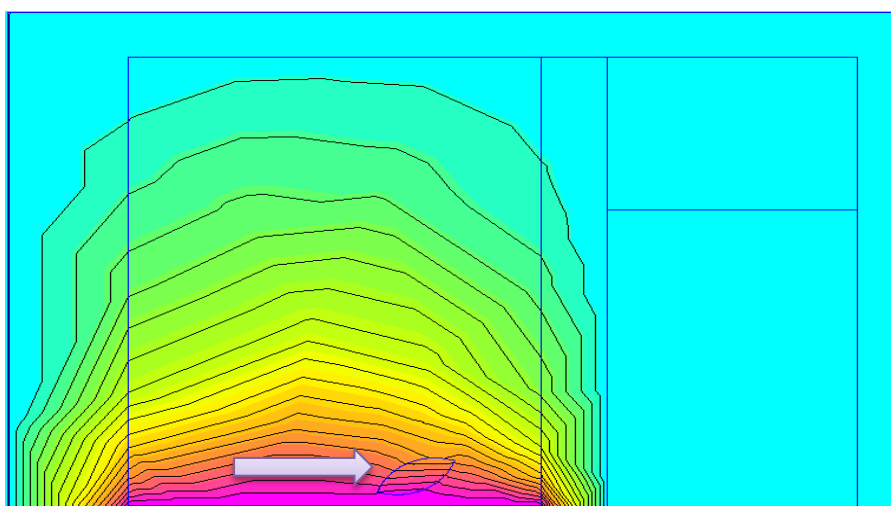


Figura 4.6 Comportamiento electrostático de la sección con anomalía tipo perforación en papel.

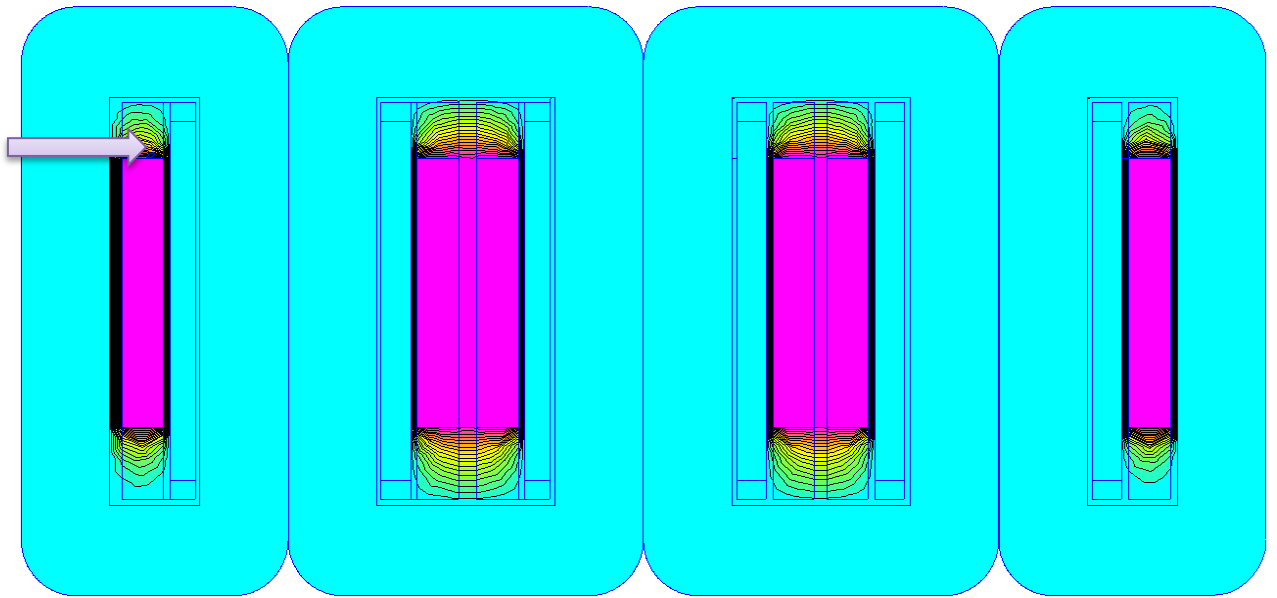


Figura 4.7 Ubicación de la anomalía tipo perforación en papel.

De este modo se presenta una distorsión en la región en cuestión, donde el efecto de acumulación de líneas de campo eléctrico es propicio para el desarrollo de eventos de descargas parciales.

Un segundo efecto de detorsión del campo eléctrico se ejemplifica por medio de una bobina de alta tensión, de la cual sobresale un conductor, resultado de un descuido en el proceso de fabricación. El error ocasionado acorta las distancias eléctricas entre la bobina de alta y baja tensión respectivamente.

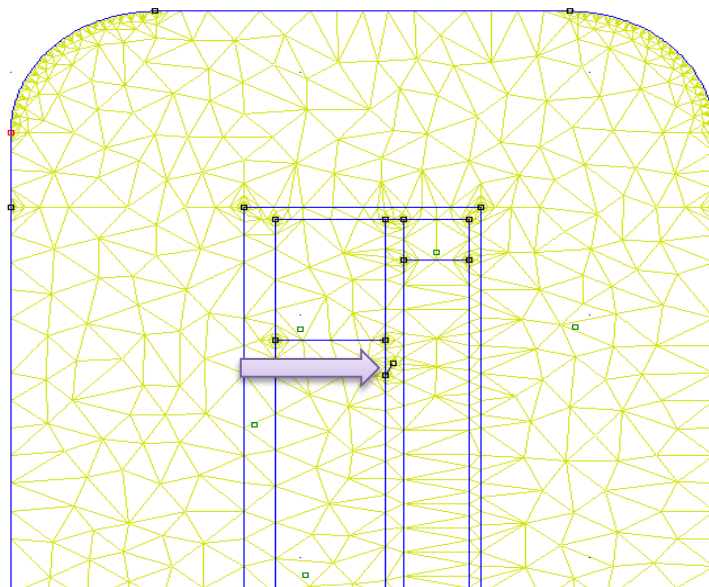


Figura 4.8 Enmallado de la sección con anomalía tipo conductor flotan

El elemento conductor prominente que se encuentra atravesando una región aislante del transformador, distorsiona severamente el campo eléctrico tal como se presenta en la figura posterior.

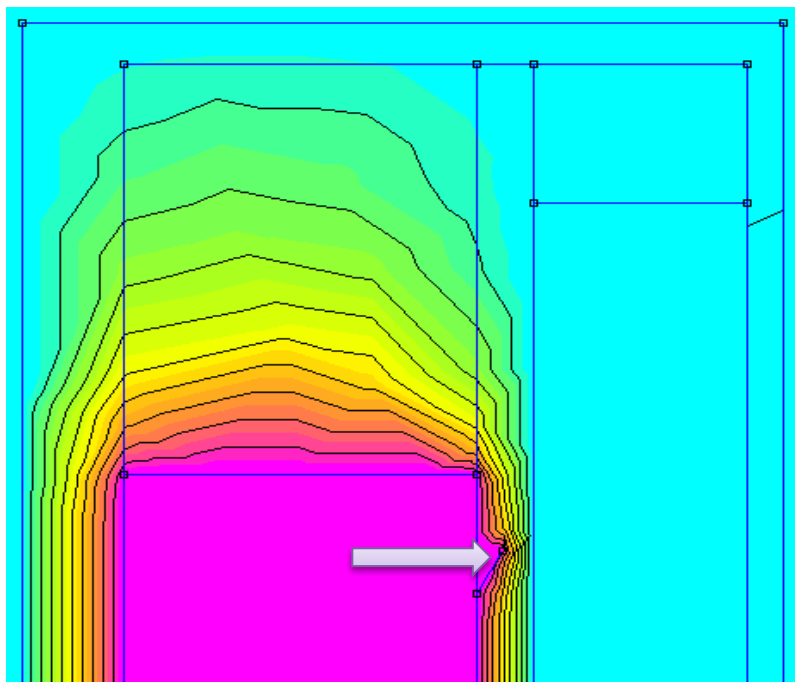


Figura 4.9 Comportamiento electrostático de la sección con anomalía tipo conductor flotante.

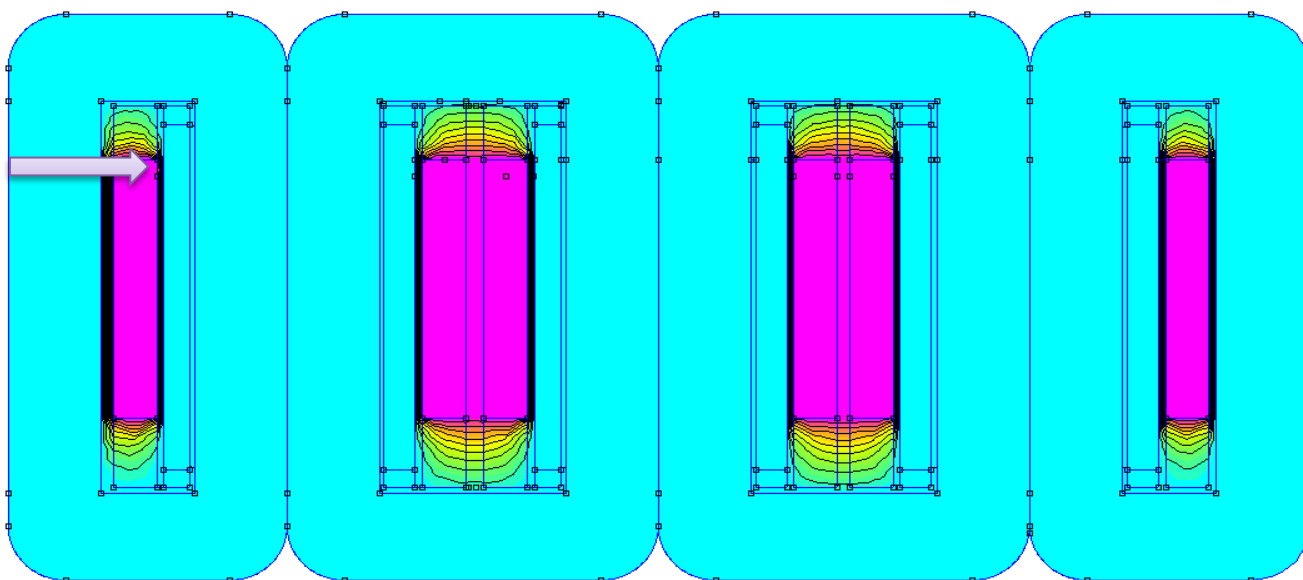


Figura 4.10 Ubicación de la anomalía tipo conductor flotante.

Se concluye que ciertos imperfectos ocasionan distorsiones del campo eléctrico y a su vez permiten la aparición de descargas parciales, que pueden conducir a una potencial falla del equipo. Es importante mencionar que las descargas parciales son repetitivas y por lo tanto progresivas, es decir un equipo en el cual no se identifique un problema a tiempo puede ser devastador, más aun cuando las tensiones de operación son considerablemente altas.

Capítulo 5

Análisis e interpretación de la prueba de descargas parciales a un transformador

El conocimiento de los patrones de DP permite realizar un análisis del estado de los aislamientos del transformador. En este capítulo se analizan los resultados de la prueba de DP realizada en el laboratorio a un transformador tipo seco.

5.1. Prueba de DP a un trafo seco de 1250 kVA

Al instalar el equipo para la ejecución de la prueba de DP, se procede a aplicar la rutina de tensión según la descripción de la norma IEC para la prueba trifásica en transformadores tipo seco. La imagen 5.1 registra la rutina de tensión aplicada en color rojo, y verde los eventos de descargas parciales presentados.

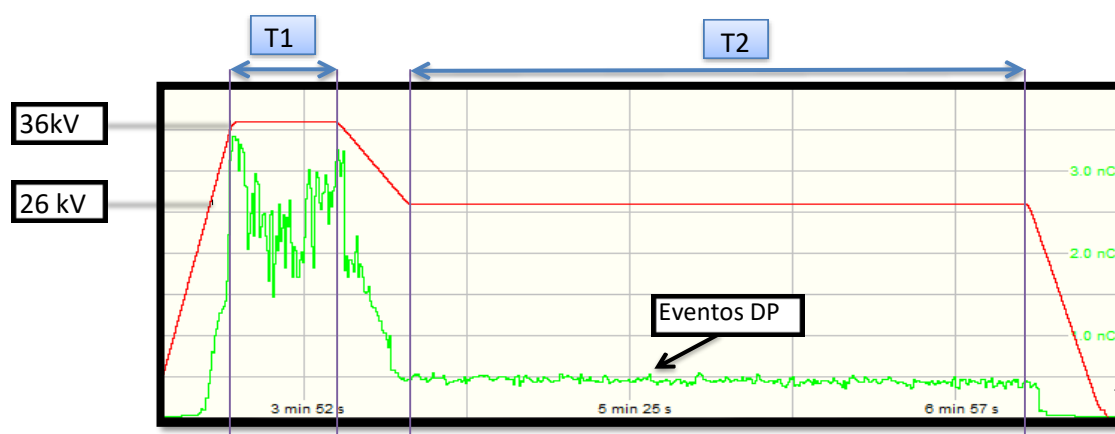


Figura 5.1 Rutina de tensión vs eventos de DP.

Haciendo uso de la herramienta 3PARD se puede observar los eventos de descargas parciales, cada uno de los ejes representa las fases del transformador analizado. Los eventos registrados en el tiempo T1+T2 son los siguientes:

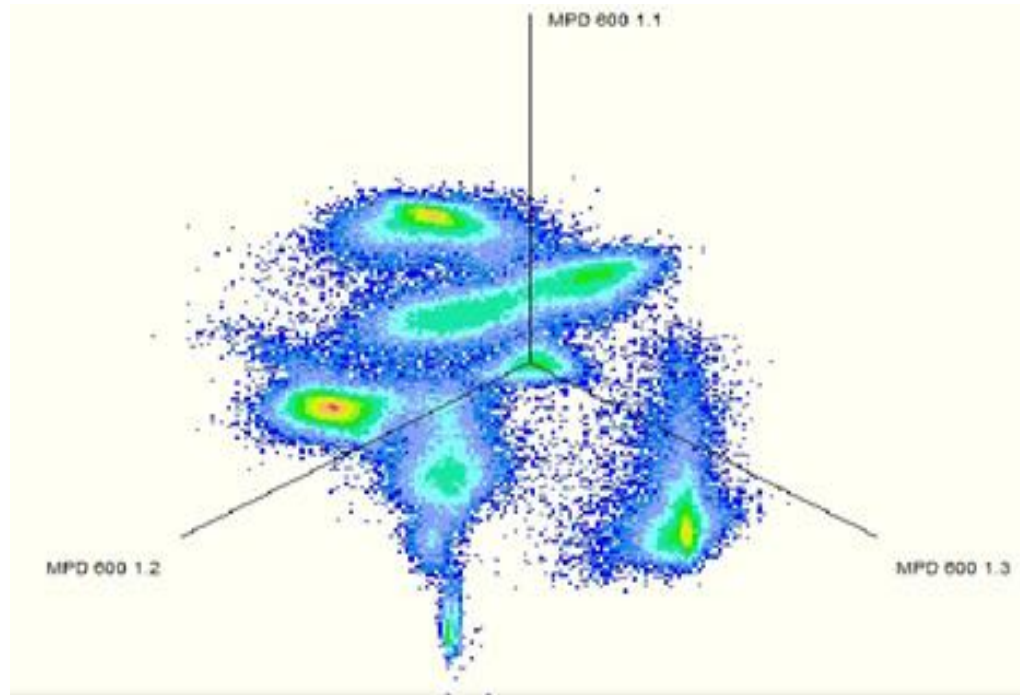


Figura 5.2 Eventos de DP, herramienta 3PARD.

Se debe realizar una separación de los tiempos T1 y T2 para el respectivo análisis. Es necesario tener presente en la interpretación que el tiempo T1 es llamado “tiempo de realce”, allí se genera un estrés eléctrico para excitar la aparición de descargas parciales en el material aislante del transformador. Una vez transcurrido el tiempo T1, los eventos de descargas parciales deberían desaparecer idealmente, si por el contrario estas continúan, se deduce que equipo bajo prueba presenta descargas parciales, posteriormente se analizarán los focos de DP mediante la herramienta 3PARD con su respectivo diagnóstico. A continuación se estudia la actividad de descargas parciales en el tiempo T1.

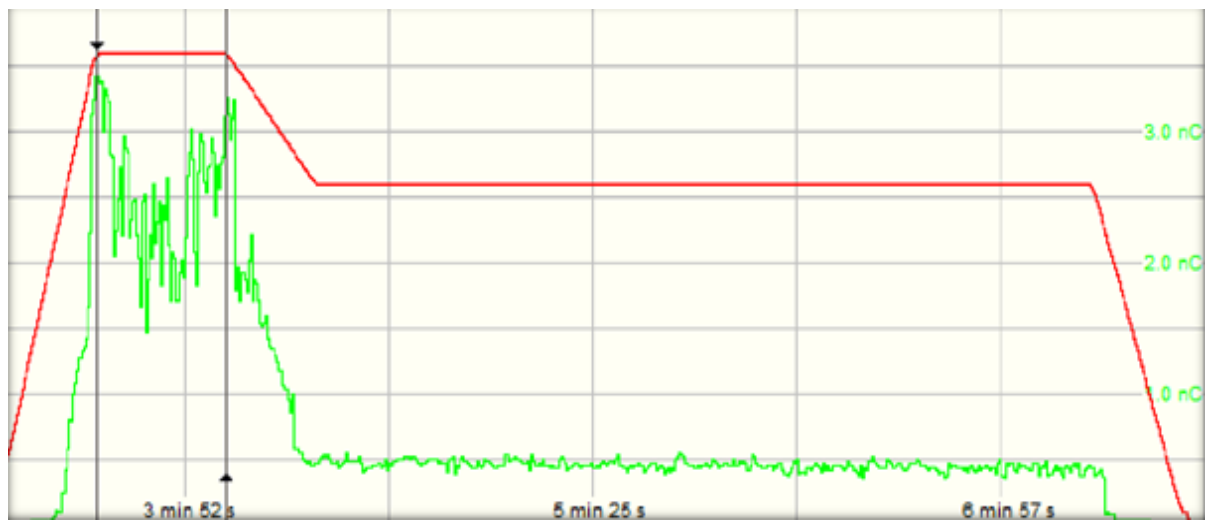


Figura 5.3 Rutina de tensión vs eventos de DP, T1.

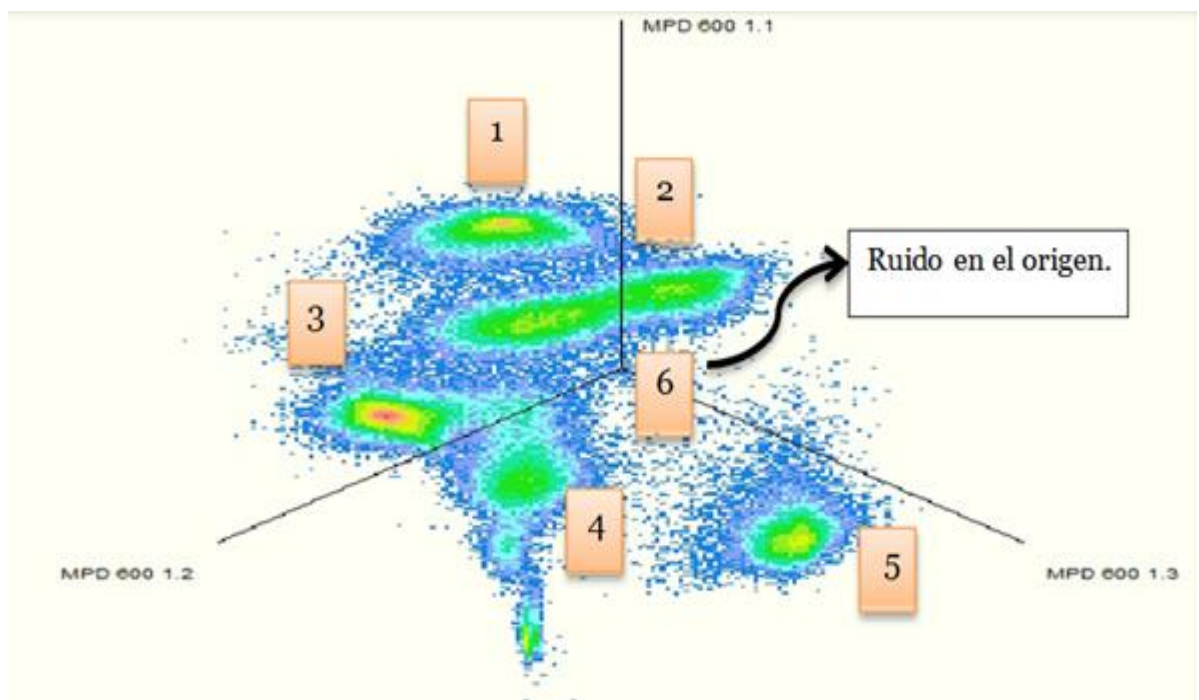


Figura 5.4 Eventos de DP para T1, herramienta 3PARD.

En la figura 5.4 es posible reconocer por lo menos 6 fuentes de descargas parciales en el periodo de prueba T1.

Para el tiempo de prueba T2 se realiza el mismo procedimiento anterior, además se enumeraron en la figura 5.6 las fuentes de descargas parciales que se repiten en ambos tiempos (T1, T2).

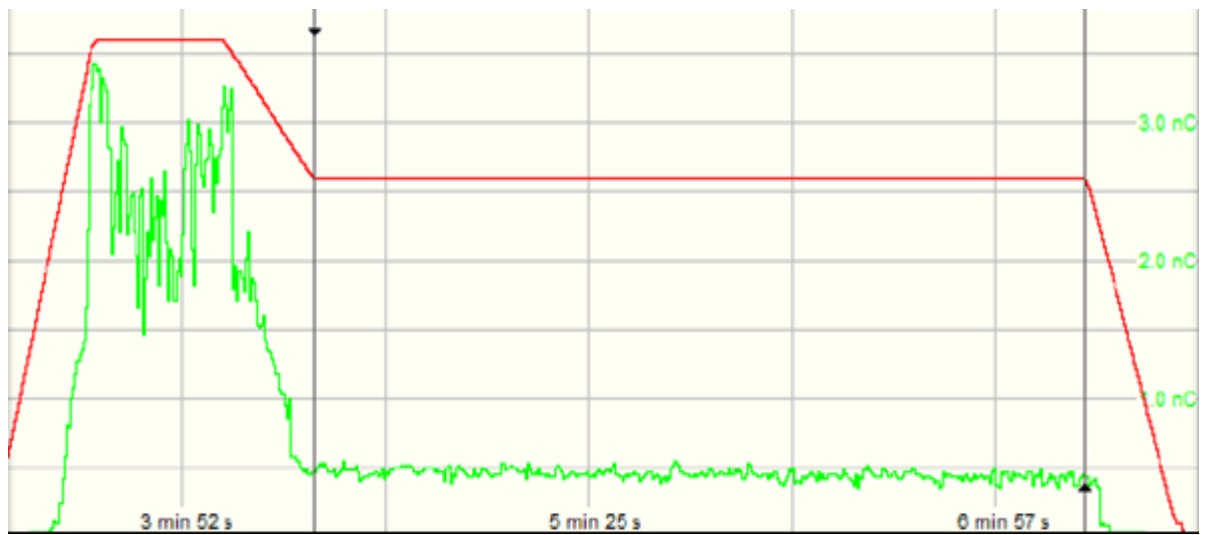


Figura 5.5 Rutina de tensión vs eventos de DP, T2.

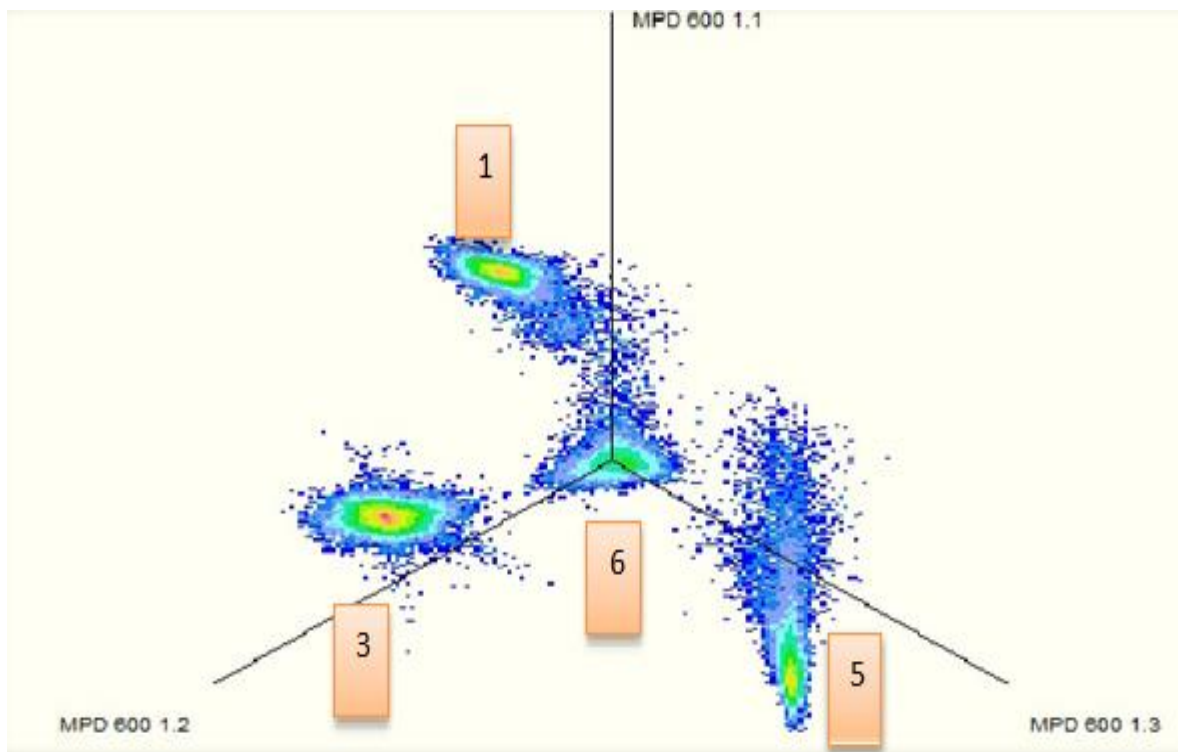


Figura 5.6 Eventos de DP para T2, herramienta 3PARD.

Con el objetivo de interpretar las fuentes de descargas parciales, se analizarán por separado las fuentes previamente demarcadas de 1 hasta 6, tanto para el tiempo T1 como para T2.

Fuente 1:

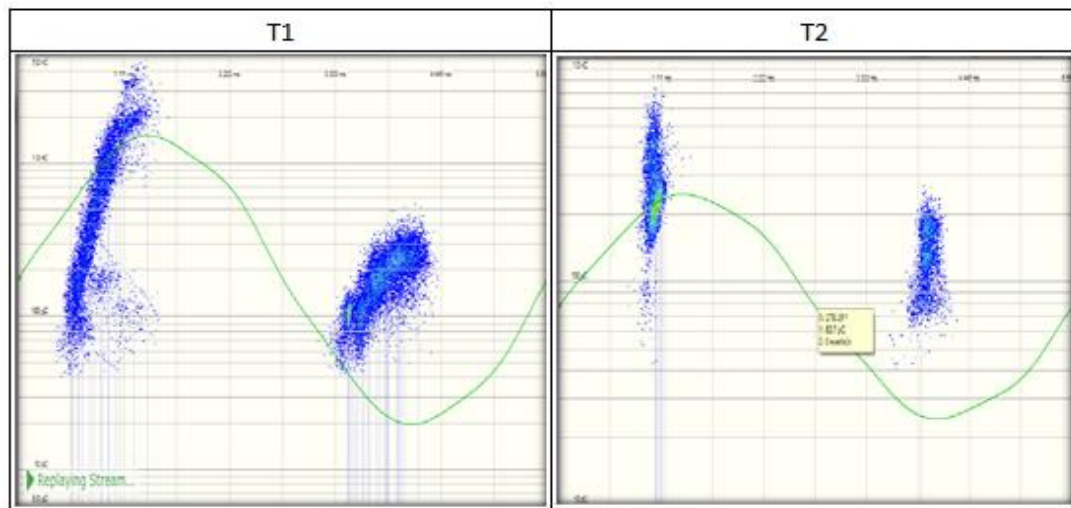


Figura 5.7 Patrón de DP, fuente 1.

Fuente 2 (solo ocurre para T1):

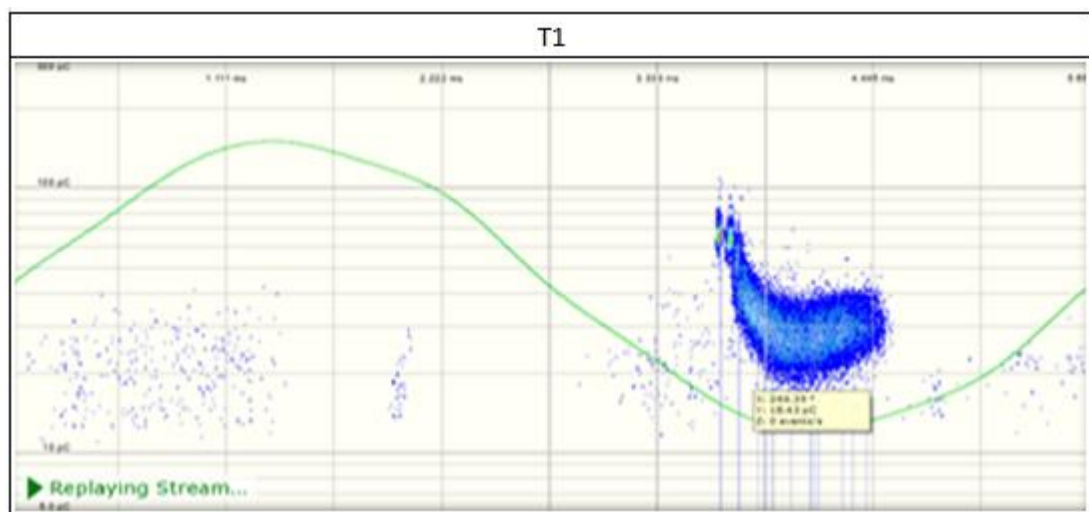


Figura 5.8 Patrón de DP, fuente 2.

Fuente 3:

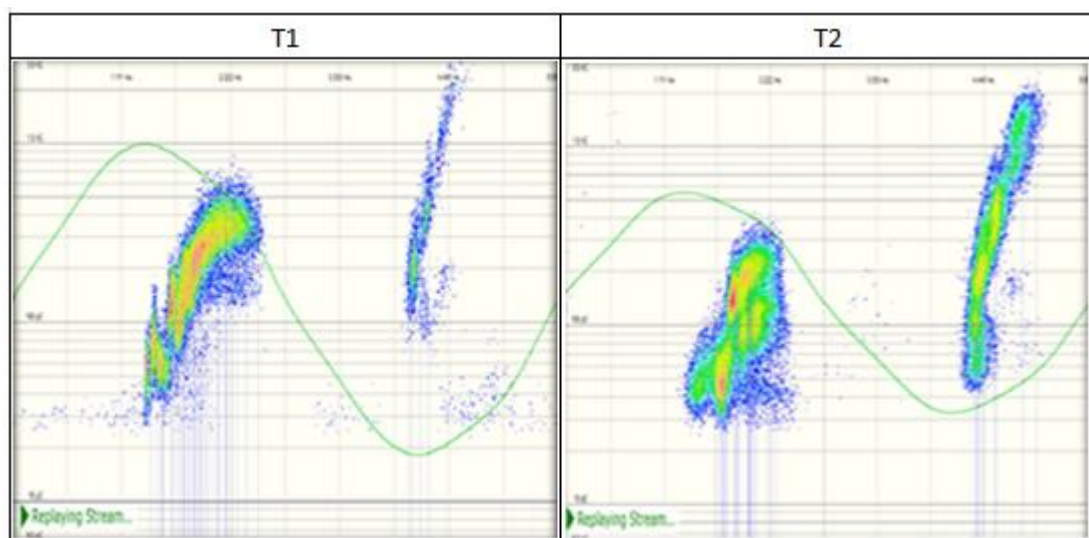


Figura 5.9 Patrón de DP, fuente 3.

Fuente 4 (solo ocurre para T1):

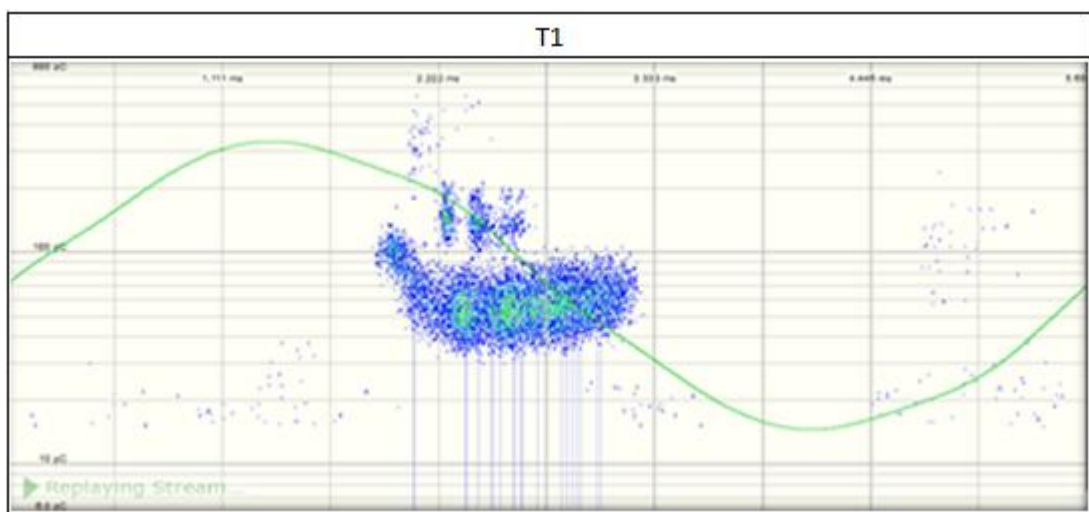


Figura 5.10 Patrón de DP, fuente 4.

Fuente 5:

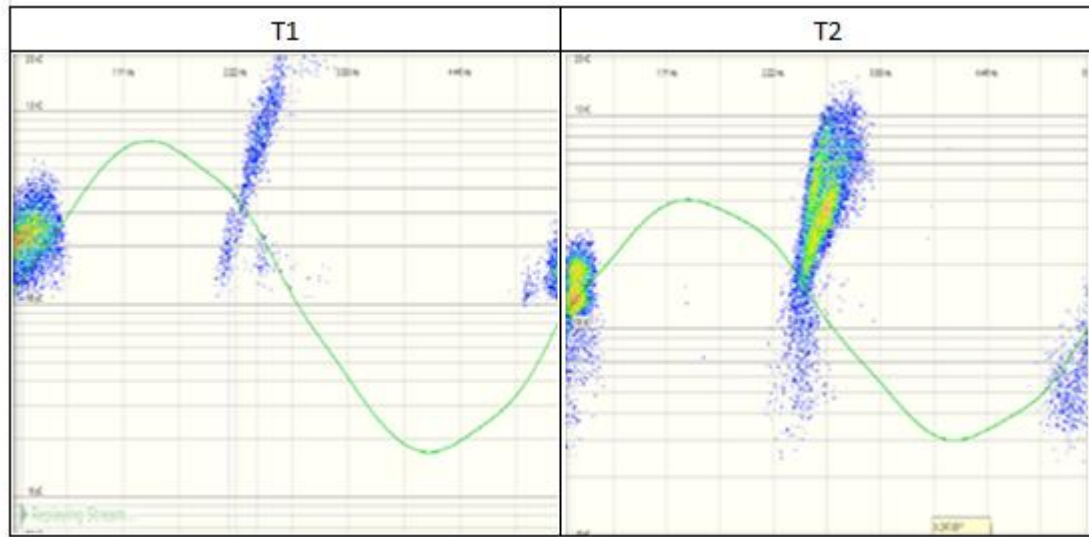


Figura 5.11 Patrón de DP, fuente 5.

Fuente 6:

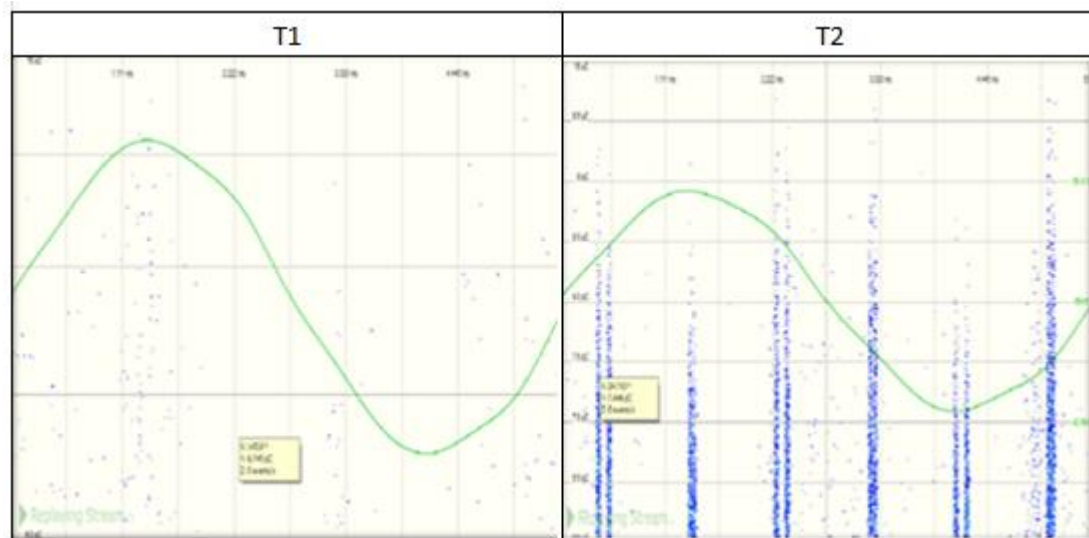


Figura 5.12 Patrón de DP, fuente 6.

En el diagnóstico del transformador seco se puede concluir que: las fuentes 1 y 3 corresponden esencialmente a descargas parciales internas debidas a cavidades en

la resina epóxica, que con el tiempo van agrietando y debilitando el cuerpo aislante de los devanados. Esta anomalía se presenta en los dos tramos de tiempo T1 y T2 analizados.

La fuente número 2 se registra únicamente en el tiempo T1, es decir se extingue para el tiempo de prueba T2. Este patrón obedece al efecto corona, donde el aire es ionizado por medio de la conexión de alta tensión existente entre los aisladores y los capacitores de acople. Este efecto se presenta cuando se alcanzan tensiones cercanas a 30 kV, aunque existen factores ambientales como la humedad que pueden hacer variar el valor de tensión indicado.

El tema de aterrizaje se evidencia con la cuarta fuente. Cuando algún accesorio, región del núcleo magnético o cualquier elemento cercano al equipo de prueba no se encuentra aterrizado, se registra una especie de cinta en el patrón de descargas parciales.

Uno de los eventos más comunes en la prueba de descargas parciales son las “descargas superficiales”, tal como se refleja en la quinta fuente de DP. Este tipo de descargas están estrechamente relacionadas con el tema de la limpieza. Existen 2 tipos de descargas superficiales, la primera es la interna, la cual es intrínseca al proceso de fabricación de las bobinas en resina epóxica, adicionalmente este tipo de DP no es remediable puesto que la polución está confinada en el material epóxico. Un segundo tipo es la de carácter externo, este caso obedece a la contaminación que circunda el transformador y que evidentemente puede ser corregido con acciones óptimas de limpieza. Este caso específico corresponde a descargas superficiales internas.

Por último se contempla una sexta fuente en el análisis de descargas parciales. Dicho patrón no corresponde propiamente al equipo bajo prueba, este ocurre debido al ruido ocasionado por el generador que alimenta el circuito de prueba. Un filtro digital que omita el efecto del campo del generador es una alternativa adecuada para eliminar esta anomalía. Investigaciones previas efectuadas al equipo de generación en el laboratorio de potencia por la empresa inducor Argentina, determinaron altos niveles de descargas parciales, aunque se implementó un filtro, aún existe una pequeña magnitud como se muestra en la figura 5.12.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

En este trabajo de grado se han analizado algunos factores que se pueden presentar en el proceso de manufactura del transformador eléctrico tipo seco y sumergido en líquido refrigerante y que influyen en la aparición de las no deseables descargas parciales, que afectan la vida del aislamiento.

Con el diseño y validación de la celda de prueba construida en la empresa, para los ensayos de descargas parciales sobre los diferentes prototipos, se lograron patrones significativos para el diagnóstico de transformadores en la prueba de descargas parciales. Con los resultados obtenidos, se consolidó un compendio de información importante, que realiza un aporte al estado del arte y que facilita al analista, un mejor dictamen de la prueba de descargas parciales realizada al transformador. Existe una gran cantidad de factores que pueden influir en la aparición de descargas parciales en un transformador, en este trabajo se analizaron unas algunos de ellos.

Mediante el análisis de los resultados de los prototipos, se identificó que problemas como la suciedad, exceso de cinta en la manufactura del transformador y conformación de grandes campos eléctricos no previstos desde el diseño de la parte activa, son condiciones que someten al transformador a eventos severos de descargas parciales.

Se determinó que en transformadores secos tipo encapsulados, las fuentes de descargas se presentan en dos lugares específicos: los aisladores o el devanado. En ambos casos, el patrón más común obtenido corresponde a las descargas parciales superficiales, las cuales, están relacionadas con el tema de polución en el proceso

de producción del transformador. Por esta razón, el proceso de manufactura requiere de adecuadas condiciones de higiene y limpieza, con especial cuidado en las partes de difícil acceso, donde pueden concentrarse grasas, de uso común en el proceso de fabricación, adheridas con rebaba del mismo material de las bobinas.

Adicionalmente, en la prueba de descargas parciales a transformadores secos tipo encapsulados, es muy probable hallar descargas internas, debido a cavidades presentes en la resina epóxica de los devanados. Por esta razón el proceso de encapsulamiento de las bobinas, debe realizarse bajo el más riguroso control de calidad.

Por otra parte, el tema del aterrizaje del transformador, es un detalle que debe ser atendido cuidadosamente, debido a que los eventos de descargas parciales pueden llegar a ser en significativos, en caso de no contar con una adecuada puesta a tierra. Para los transformadores sumergidos en aceite y que han estado en servicio, es natural que el aislamiento y el aceite estén envejecidos, razón por la cual se pueden presentar valores muy altos de descargas parciales. Si el transformador en cuestión es tipo pedestal o pozo, las boquillas o aisladores de estos transformadores poseen una distancia de fuga corta, que puede presentarse como una posible causa de descargas parciales.

Para los transformadores de potencia, la impureza del aceite es un factor relevante en la aparición de descargas. Por esta razón es necesario, evitar cualquier cavidad con aire confinado o partículas ajenas, durante el proceso de llenado de aceite. Una práctica adecuada, consiste en realizar pruebas fisicoquímicas al aceite (desgasificado y filtrado) y verificar la inexistencia de partículas indeseadas, que promuevan el deterioro del papel y creación de lodos en la cuba del transformador. Los resultados de pruebas como resistencia de aislamiento y factor de potencia del aislamiento, pueden indicar preliminarmente, si el transformador o el aceite están en buenas condiciones para realizar la prueba de descargas parciales.

Con respecto a la ejecución de la prueba de descargas parciales, es conveniente blindar las conexiones de alta tensión con tubos metalizados, como los usados en refrigeración, siempre y cuando se alcancen los 30 kV en el equipo bajo prueba. Esto con el fin de eliminar los efectos corona que suelen aparecer al superar el umbral de tensión indicado. Para el correcto dictamen del estado del aislamiento del transformador, es necesaria una adecuada calibración al iniciar la prueba de descargas parciales, de no ser así las medidas que el equipo evidencie serán erróneas y el resultado no corresponderá al estado real de los aislamientos del transformador. Poner a punto esta prueba, requiere invertir gran cantidad de tiempo, en pro de conseguir resultados confiables.

6.2. Trabajos futuros

- Como trabajos futuros, se pretende reconocer el impacto que genera el uso de la cinta en la parte activa de un transformador. El uso de esta es muy común en el proceso de bobinado y en la ubicación de los aislamientos o cortes en el ensamble de un transformador. El uso de este material, puede incluir colchones de aire una vez sumergida la parte activa en la cuba, e incluso es común que el aislamiento que está recubierto de cinta no adquiera la impregnación necesaria de aceite, estas regiones pueden ser propicias para el desarrollo de eventos de descargas parciales, e influir negativamente en la magnitud de DP admisibles. Para este trabajo es necesario el uso de la celda de prueba como herramienta esencial en la determinación de la severidad de la cinta en el proceso productivo de los transformadores.
- Mediante la celda de prueba, se desea efectuar un análisis de descargas parciales en el aceite mineral envejecido y su efecto sobre el papel. En muchas ocasiones los transformadores ingresan a la planta para practicarles un mantenimiento, es muy usual que el aceite de estos transformadores empiecen a perder su característica aislante dando lugar a eventos de DP. Un trabajo de estas características podría conducir a una periodicidad en el cambio del aceite para evitar problemas severos en la parte activa de un transformador, lo anterior con el fin de conservar los activos de un sistema eléctrico.

Apéndices

A. Bibliografía

- [1] *High-voltage test techniques –Partial discharge measurements*, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard IEC 60270, 2000.
- [2] *Power Transformers - Part 1:General*, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard IEC 60076-1, 2011.
- [3] *Power Transformers - Part 3:Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard IEC 60076-3, 2013.
- [4] *Power Transformers - Part 11: Dry-type transformers*, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard IEC 60076- 11, 2004.
- [5] *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Standard C57.12.00, 2010.
- [6] R. Liao *et al.*, “Recognition of Partial Discharge Patterns”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting.*, ISSN: 1932-5517, pp 1-8, 2012.
- [7] JI Sheng-Qiang *et al.*, “Recognition of Partial Discharge in Oil-Paper Insulation Based on Analytic Hierarchy Process”, *Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*., Xi'an, pp.687-691, 2011.
- [8] D. F. García Gómez, “Diagnóstico de aislamiento en transformadores de potencia mediante detección UHF de descargas,” Ph.D. tesis, Dept. Ing. Eléctrica, *Universidad Carlos III*, Madrid, España, 2012.
- [9] D. F. García Gómez, M. J. Sánchez G., “Diseño de un sistema de adquisición y análisis de datos para la prueba de descargas parciales,” M.S. tesis, Dept. Ing. Eléctrica, *Universidad del Valle*, Cali, Colombia, 2006.
- [10] Anonymous. (2016, Nov 19). *Finite Element Method Magnetics: Download (4th ed.)* [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/download>

